



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

REGULOVATELNÝ ZDROJ PRO NAPÁJENÍ LED

CONTROLLABLE POWER SUPPLY FOR LED LIGHTING

SEMESTRÁLNÍ PRÁCE

SEMESTRAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Morávek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Jaroslav Boušek, CSc.

BRNO 2017

Semestrální práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**
Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Petr Morávek

ID: 167734

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Regulovatelný zdroj pro napájení LED

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte regulovatelné napájení pro světelný zdroj využívající LED. Zdroj bude napájený za sítě a měl by umožňovat regulaci osvětlení proudem a manuální změnu spektrální charakteristiky. Maximální příkon celého zařízení bude 30W.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího práce

Termín zadání: 18.9.2017

Termín odevzdání: 14.12.2017

Vedoucí práce: prof. Ing. Jaroslav Boušek, CSc.

Konzultant:

doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá popisem problematiky umělých zdrojů osvětlení, které ke své činnosti využívají luminiscenčních diod. Do detailu jsou rozebrány parametry diod a záření, jež emitují. V práci je dále popsán způsob napájení a regulace výkonu LED. Praktická část demonstruje jeden z možných způsobů realizace LED osvětlení. Řešení nabízí možnost nastavení teploty chromatičnosti ručně i automaticky. Funkčnost řešení je ověřena experimentálně.

ABSTRACT

This thesis deals with the description of artificial light sources, that use light-emitting diodes for their operation. Further down, the parameters of LEDs and their emissions are detailed. The work follows with the characterization of principles of LED power regulation. In the practical section, an example of one of the possible LED light source topologies, is designed. The offered solution includes the options to manually and automatically regulate the chromaticity of emitted light. Functionality of the solution was verified experimentally.

KLÍČOVÁ SLOVA

Regulace proudu, chromatičnost, LED dioda, biodynamické osvětlení

KEYWORDS

Current control mode, chromaticity, LED, biodynamic lightning

MORÁVEK, P. *Regulovatelný zdroj pro napájení LED*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 63 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jaroslav Boušek, CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Regulovatelný zdroj pro napájení LED jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Jaroslavu Bouškovi, CSc. za rychlé nalezení řešení všech problémů, které při vypracovávání práce nastaly, za lidský přístup a za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc. Dále děkuji kolegům a spolupracovníkům z prostředí mé odborné praxe, jejichž nezištná pomoc mi umožnila věnovat se práci na plno a za to, že mi pomohli urychlit řešení technických a technologických potíží. V neposlední řadě děkuji své rodině a přítelkyni, kteří mi byli morální oporou vždy, když to bylo nutné. Děkuji.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072
Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

Seznam obrázků	6
Seznam tabulek	7
Úvod	8
1 Teoretická část	9
1.1 Elektroluminiscenční diody	9
1.1.1 Spektrální složení světla LED.....	9
1.1.2 Konstrukce luminiscenčních diod.....	10
1.1.3 Parametry záření LED	12
1.1.4 Vliv osvětlení na lidský organismus	14
1.2 Regulace výkonu luminiscenčních diod	14
1.3 Parametry obvodu regulátoru.....	15
1.3.1 Spínací frekvence.....	15
1.3.2 Cívka.....	16
1.3.3 Spínací tranzistor	16
2 Praktická část	17
2.1 Návrh napájení.....	17
2.1.1 Upořádání obvodů.....	17
2.1.2 Vstupní obvod.....	18
2.1.3 Výběr vhodných diod.....	19
2.1.4 Regulátor.....	19
2.2 Návrh ovládací logiky.....	21
2.2.1 Napájení kontroléru	21
2.2.2 Konfigurace kontroléru.....	22
2.3 Simulace regulátoru	22
3 Realizace	24
3.1 Realizace HW	24
3.1.1 Návrh DPS na substrátu FR4	24
3.1.2 Návrh DPS na hliníkovém substrátu.....	26
3.2 Realizace FW	28

3.3	Určení hodnot klíčových proměnných.....	31
3.3.1	Míchání dvou LED světél různých barev	32
3.3.2	Určení vhodných teplot chromatičnosti pro dané denní doby	34
4	Experimentální část	36
5	Závěr	40
	Seznam literatury	42
	Seznamy symbolů, veličin a zkratk	45

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Homo- (vlevo) a heterogenní (vpravo) PN přechod zapojen v propustém směru [3]	9
Obrázek 2: Uspořádání LED v SMD pouzdře [6]	11
Obrázek 3: Možnosti kontaktování čipu LED [7]	11
Obrázek 4: Vliv luminoforu na spektrum diody [8]	12
Obrázek 5: Spektrum teplot chromatičnosti různých zdrojů světla [10]	13
Obrázek 6: Barevný prostor CIE 1931 s křivkou černého tělesa.....	13
Obrázek 7: Závislost světelného toku a teploty chromatičnosti na proudu LED[14].....	14
Obrázek 8: Blokové schéma zařízení.....	18
Obrázek 9: Vstupní usměrňovací obvod.....	18
Obrázek 10: VA charakteristika XPH70.2 [14].....	19
Obrázek 11: Typické zapojení obvodu s HV9961 [17]	20
Obrázek 12: Časový průběh napětí a proudu diodami po startu regulátoru	22
Obrázek 13: Detail průběhu proudu (zelená, Y2 – výřez 790 až 830 mA) a napětí (červená, Y1) diodami	23
Obrázek 14: Detail spínacího cyklu (17,870 až 17,895 ms).....	23
Obrázek 15: Detail DPS v části vstupního filtru.....	25
Obrázek 16: Tok proudu (vyznačen žlutě) v sepnuté (vlevo) a rozepnuté (vpravo) části spínacího cyklu zdroje	26
Obrázek 17: Řez DPS s kovovým substrátem	27
Obrázek 18: DPS typu „hvězda“, běžně dostupný vzorek (vlevo), výsledný návrh (vpravo).....	28
Obrázek 19: Vývojový diagram.....	30
Obrázek 20: Příklad denního cyklu biodynamického osvětlení	34
Obrázek 21: Východy a západy slunce v roce 2018	35
Obrázek 22: Rozložení intervalů teplot světla během roku	35
Obrázek 23: Foto zařízení a zapojení měřících přístrojů.....	36
Obrázek 24: Proud (zeleně) a napětí (fialově) na LED (vlevo) a detailní průběh proudu (vpravo).....	37
Obrázek 25: Detail spínání regulátoru zobrazující signál hradla (modře), proud LED (zeleně) a napětí snímacího rezistoru (fialově)	37
Obrázek 26: Průběh napětí (fialově) a proudu (zeleně) při použití 50% PWM (modře) 38	
Obrázek 27: Detail průběhů spínání tranzistoru (tmavomodře), napětí snímacího odporu (fialově) a proudu zátěží (zeleně) při použití 50 % PWM (světlemodře)....	39

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Materiály LED podle vyzařované barvy [5]:.....	10
Tabulka 2: Srovnání komponentů regulátoru pro různé spínací frekvence [16]	15
Tabulka 3: Výběr spínacího tranzistoru.....	21
Tabulka 4: Vlastnosti vrstev kovové DPS	27
Tabulka 5: Přehled módů zařízení	29
Tabulka 6: Přehled spektrálních parametrů použitých diod	32
Tabulka 7: Souhrn hodnot pro míchání teplého a studeného světla	33

ÚVOD

Světlo a jeho nejrůznější zdroje hrají již od počátku civilizace v životě lidí velkou roli. V dobách pravěku znamenala přítomnost ohně rozdíl mezi životem a smrtí. Později, když byl znám postup výroby svící a loučí, znamenalo to mimo jiné, že lidé již nejsou omezeni denním světlem. Mohli tedy pracovat, studovat či se bavit výrazně delší dobu. Asi největší pokrok v osvětlování souvisí s rozšířením elektřiny. Na přelomu 19. a 20. století se začala největší evropská města zbavovat zastaralých a nákladných plynových lamp. Namísto nich se instalovalo první veřejné osvětlení na elektrický proud.

V současnosti požadavky na osvětlení neustále rostou. Každá domácnost vyžaduje levné a stabilní osvětlení všech místností. Městské ulice je nutné udržovat přehledné k zabezpečení chodců i řidičů. Továrny s nepřetržitým provozem si nemohou dovolit ani krátké výpadky. Neustále se proto hledá způsob, jak získat zdroj světla, který je levný, účinný a má co nejdelší životnost. Za posledních sto let bylo pro osvětlování použito mnoho různých druhů elektrických lamp, od obloukových z návrhu Františka Křižíka až po halogenové zářivky. Jedním z nejsilnějších současných trendů jsou zdroje světla na bázi elektroluminiscenčních diod (LED – light emitting diode). Diody typu LED nabízejí oproti jiným zdrojům vysokou účinnost, pro jejich správnou funkci je však nutné použít pro jejich napájení speciálně nastavené obvody.

Problematikou regulace LED diod se zabývá teoretická část této práce. V první kapitole jsou shrnuty základní poznatky o vlastnostech a použití diod. Ve druhé pak následuje rozbor regulace výkonových LED diod.

Praktická část této práce obsahuje popis návrhu řídicího obvodu dle zadání a simulace navrženého obvodu. Poté následuje popis konstrukce zařízení a návrh obslužného programu. Funkce zřízení byla ověřena měřením shrnutým v experimentální části.

1 TEORETICKÁ ČÁST

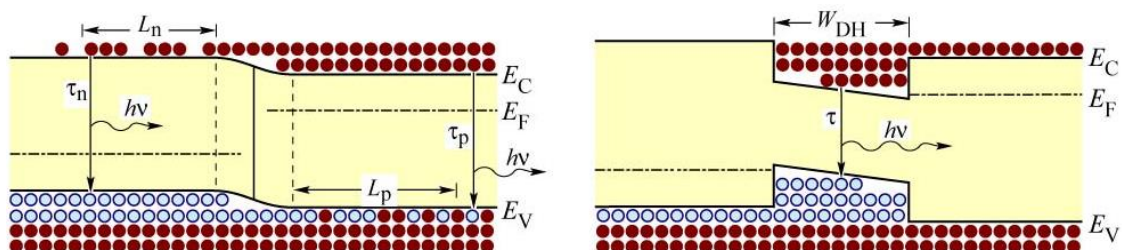
Tato část semestrální práce se skládá ze dvou hlavních kapitol. V první z nich jsou shrnuty základní poznatky týkající se luminiscenčních diod. Ve druhé pak následuje rozbor parametrů regulátorů používaných pro řízení světelných zdrojů s těmito diodami.

1.1 Elektroluminiscenční diody

Pod pojmem LED rozumíme polovodičovou součástku s jedním přechodem PN. Ten je polarizovaný v propustném směru. Proud, který přechodem prochází, vybudí elektrony v krystalické mřížce polovodiče na vyšší energetickou úroveň. Během rekombinace těchto excitovaných elektronů se ze součástky uvolňuje elektromagnetické záření. Část energie se při rekombinaci absorbuje v krystalické mřížce, což se projeví zvýšením teploty součástky. Platí, že jak světelný tok, tak i ztrátový výkon jsou funkcemi proudu přechodem, nikoliv přiloženým napětím [1].

1.1.1 Spektrální složení světla LED

Záření, které se z diody uvolňuje, má velmi úzké spektrum. To znamená, že každý PN přechod může zářit pouze jednou barvou. Konkrétní odstín závisí na šířce zakázaného pásu. Ta je určena použitými materiály. Dříve se pro luminiscenční diody používaly PN přechody, které byly založeny na jednom materiálu, typicky Galium Arsenid (GaAs), s různými dopanty (tzv. homogenní přechody) [2]. V současnosti je běžné používat pro výrobu LED heterogenní přechod. Oblasti P a N jsou v tomto případě složeny z různých materiálů, např. GaAs/AlGaAs [2]. Na obrázku níže jsou rozdíly mezi pásovými modely obou typů přechodu.



Obrázek 1: Homo- (vlevo) a heterogenní (vpravo) PN přechod zapojen v propustném směru [3]

Důvodem pro odstoupení od homogenních přechodů je jejich nižší účinnost. Je konstrukčně náročné dosáhnout toho, aby dostatečné množství elektronů rekombinovalo za vzniku elektromagnetického záření. Přechod musí mít malý objem a co nejúžší část typu P. Při použití heterogenního přechodu je snížena absorpce uvolněných fotonů díky tomu, že jednotlivé materiály mají různý index lomu a je tedy možné je využít ke směrování světla [4].

Dominantní vlnovou délku vyzářeného světla lze vyjádřit následujícím vztahem [1]:

$$\lambda = \frac{h * c}{E * e} \quad (1.1)$$

kde λ je vlnová délka, h Planckova konstanta, c rychlost světla ve vakuu, E energie zakázaného pásu a e elementární náboj. Souhrn jednotlivých barev LED, příslušných vlnových délek a použitých materiálů je v tabulce 1:

Tabulka 1: Materiály LED podle vyzařované barvy [5]:

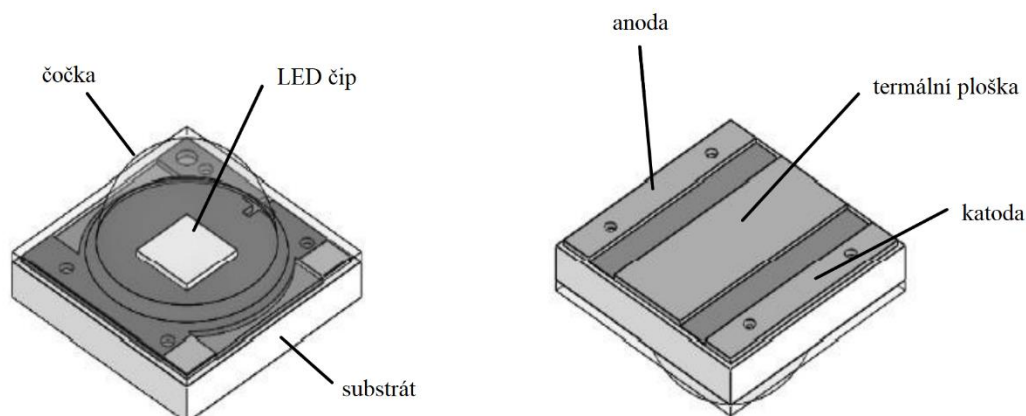
Barva	Rozsah vlnových délek [nm]	Materiál
Ultrafialová	<400	AlN, AlGaInN, AlGaInN
Fialová	400–450	InGaIn
Modrá	450–500	InGaIn, SiC
Zelená	500–570	GaP, AlGaInP, AlGaP
Žlutá	570–590	GaAsP, AlGaInP, GaP
Oranžová	590–610	GaAsP, AlGaInP, GaP
Červená	610–760	AlGaAs, GaAsP
Infračervená	>760	GaAs, AlGaAs

Z této tabulky je patrné, že získat bílé světlo přímo z jednoho PN přechodu není fyzikálně možné. V praxi se toto řeší buď RGB diodami, které v sobě kombinují více různých přechodů a nabízí tak škálu odstínů, nebo použitím vrstvy luminoforu na PN přechodu zářícím modře.

1.1.2 Konstrukce luminiscenčních diod

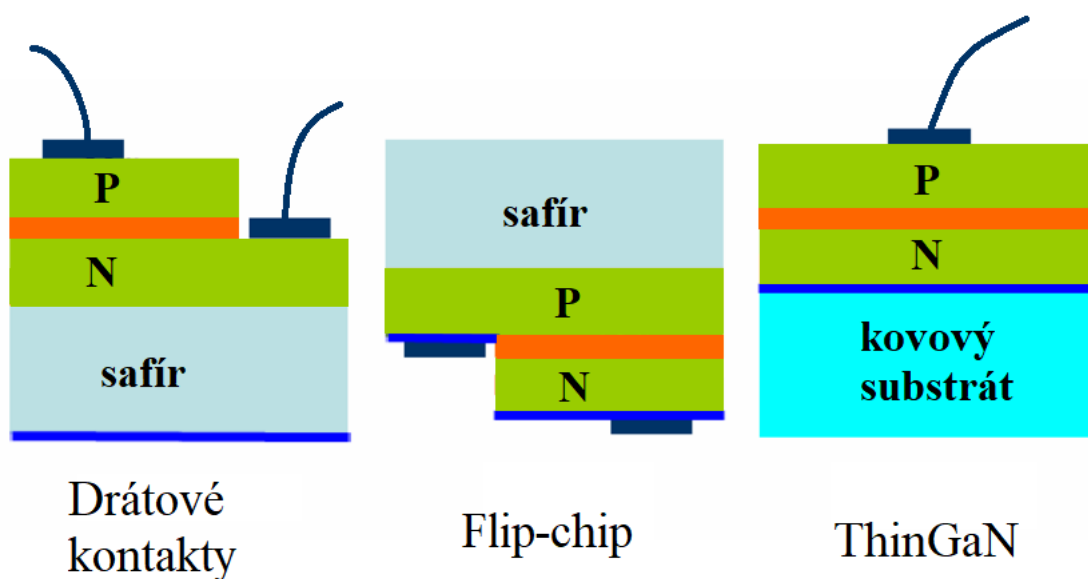
LED lze podle použití dělit do dvou skupin: indikační a výkonové. Jejich použití je patrné již z názvu. Indikační LED dosahují běžně nízkých výkonů a jsou používány jako ukazatele stavu zařízení. Výkonové diody pak slouží jako zdroje světla. Vzhledem k zaměření této práce bude v této kapitole přiblížena konstrukce výkonových luminiscenčních diod.

Platí sice, že jednou z hlavních výhod LED je jejich vysoká účinnost oproti jiným zdrojům světla, jejich ztrátový výkon, který se projeví formou vyzářeného tepla však stále nelze zanedbat. PN přechod je na vysokou teplotu velmi citlivý a jeho vlastnosti se mohou měnit [23]. Proto je nutné výkonové LED chladit. Chlazení se provádí pasivně. V případě součástek pro povrchovou montáž slouží jako chladič deska plošných spojů. Teplo se ze součástky přenáší buď dostatečně velkými kontakty nebo dedikovanou termální ploškou. Na obrázku 2 na další straně je pohled na součástku povrchové montáže od firmy CREE. Vpravo je detail pájecích plošek včetně izolovaného chladiče, vlevo pak náhled na vnitřní uspořádání součástky.



Obrázek 2: Uspořádání LED v SMD pouzdře [23]

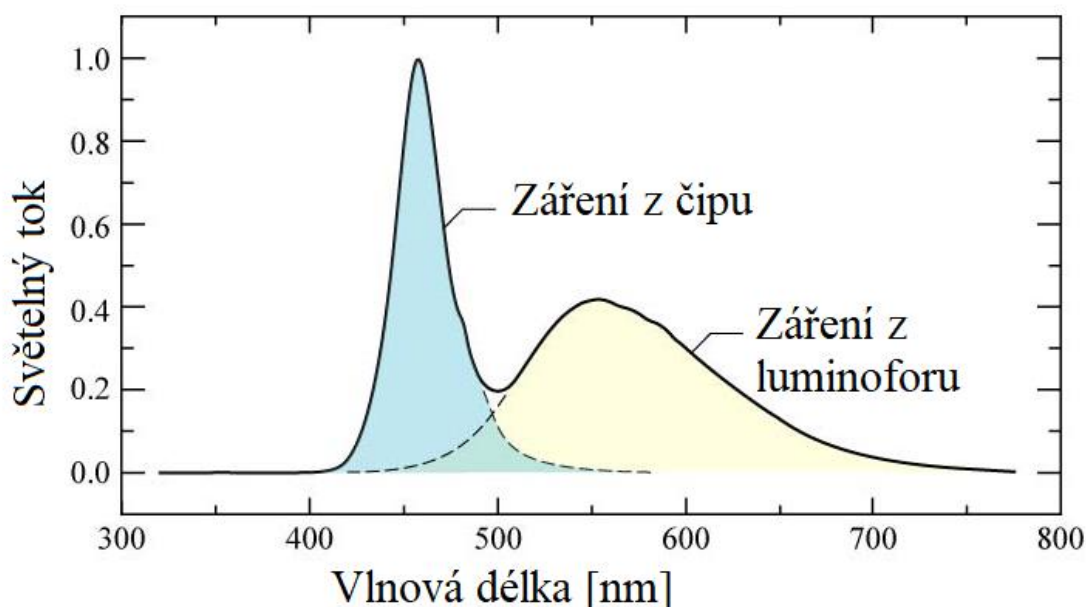
Pro lepší vedení tepla je substrát pouzdra pro SMD montáž tvořen vždy keramikou nebo kovem. Ze spodní strany se nachází kontakty pouzdra určené k pájení, na horní straně substrátu je nakontaktovaný samotný čip. V praxi existuje několik možných způsobů kontaktování, viz obrázek č.3.



Obrázek 3: Možnosti kontaktování čipu LED [6]

Nejstarší možností je kontaktování jednotlivých elektrod pomocí drátků. Substrát v tomto uspořádání slouží jen jako nosič. Další možností je napojení čipu metodou flip-chip, kdy kontakty LED jsou přiloženy přímo na substrát. Nevýhodou je nutnost vytvoření vodivého motivu přímo na povrchu substrátu [6]. Kompromisem mezi těmito dvěma přístupy je tzv. ThinGaN metoda. Jedna elektroda je napojena na vodivý substrát, druhá je nakontaktována drátkem. V prvních dvou případech je světlo vyzařováno z celého objemu čipu, v případě ThinGaN pak pouze z jeho povrchu. V dnešní době se při výrobě výkonových LED používá především poslední zmíněné technologie [6].

Jak již bylo zmíněno výše, samotný PN přechod nikdy nemůže vyzařovat bílé světlo přímo. Při konstrukci bílých luminiscenčních diod se typicky používá modrá LED na jejíž povrchu se vytvoří vrstva luminoforu. Ten spektrum doplní o další barevné složky a světlo se potom jeví jako bílé. Tloušťka této vrstvy a její přesné složení pak určují konkrétní parametry vyzařovaného světla, jako je jeho teplota a index podání barev [9]. Spektrum vyzařovaného světla a vliv luminoforu je znázorněn na obr. 4:

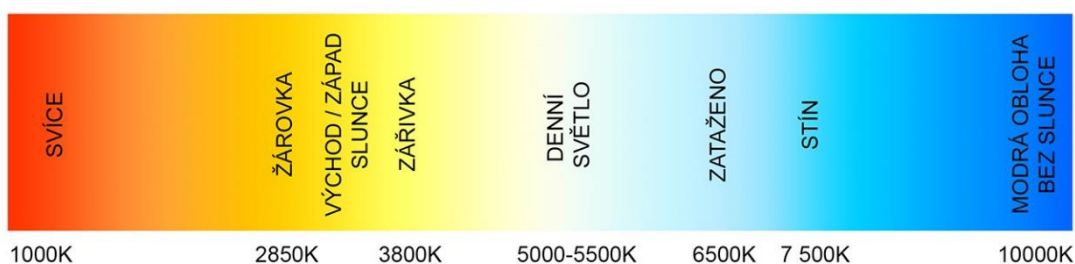


Obrázek 4: Vliv luminoforu na spektrum diody [8]

1.1.3 Parametry záření LED

Viditelné světlo je možné charakterizovat několika parametry. Pro téma této práce jsou nejdůležitější dva z nich – teplota chromatičnosti a index podání barev. Pomocí těchto údajů lze určit, jak bude na světlo reagovat lidský organismus.

Teplota chromatičnosti T_c je fyzikální veličina definovaná jako teplota absolutně černého tělesa, které uvolňuje záření se stejným spektrálním složením jako záření popisovaného svítidla. Jednotkou je Kelvin (K).



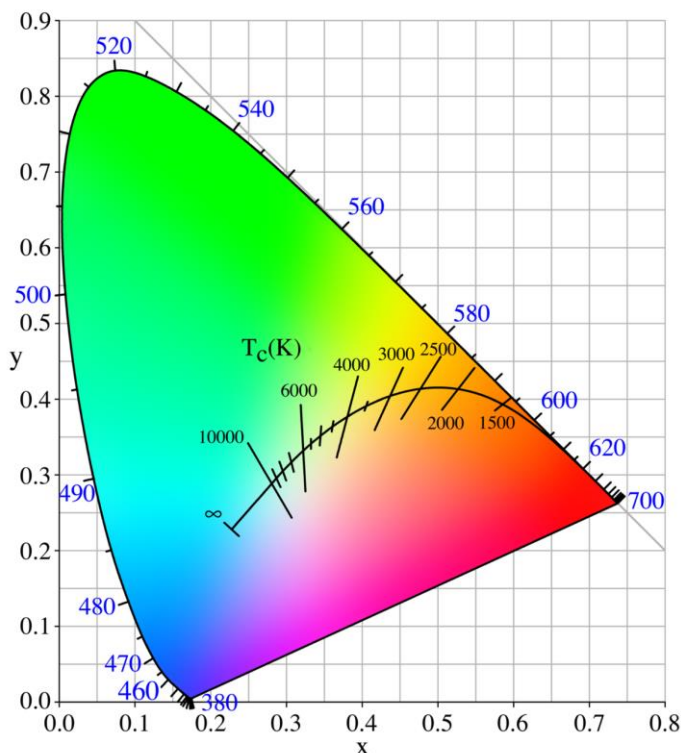
Obrázek 5: Spektrum teplot chromatičnosti různých zdrojů světla [10]

Na obrázku 5 je přehled různých zdrojů světla a jim odpovídající teplota chromatičnosti. Celé spektrum se dělí na 3 bloky [10]:

- Teplá bílá (do 3800 K)
- Neutrální bílá (od 3800 K do 5000 K)
- Studená bílá (nad 5000 K)

Teplotu chromatičnosti u LED svítidel ovlivňuje použitý luminofor – jeho složení a tloušťka vrstvy.

V souvislosti s teplotou chromatičnosti je nutné zmínit také pojem barevný prostor. Tím se rozumí matematicky definovaná množina barev. Existuje více druhů barevných prostorů, které se od sebe odlišují mimo jiné barevným modelem, ze kterého vycházejí (RGB – červená, modrá, zelená, CMYK – azurová, purpurová, žlutá, černá) [22]. V této práci se níže pracuje s prostorem označovaným CIE 1931, který je zobrazen níže:



Obrázek 6: Barevný prostor CIE 1931 s křivkou černého tělesa [21]

Kombinací souřadnic x a y náležících intervalu $\langle 0,1 \rangle$ lze získat libovolný odstín viditelný lidským okem. Třetí souřadnice pak určuje intenzitu. V centru prostoru je vyznačená tzv. křivka černého tělesa. Body této křivky odpovídají spektrálnímu složení záření absolutně černého tělesa [21]. Přímkou, jež tuto křivku protínají, spojují body s konstantní teplotou chromatičnosti. Výrobci bílých LED pak v katalogových listech uvádí detail této křivky s vymezenými oblastmi v jejím okolí, ve kterých se nachází spektrální charakteristiky jejich produktů [14].

Index podání barev může nabývat hodnot 0 až 100. Určuje přitom jak věrně vnímá při daném osvětlení lidské oko barvy osvětlených předmětů. Pro $R_a = 0$ barvy neodpovídají vůbec, pro $R_a = 100$ jsou barvy vnímány naprosto věrně [11]. Index podání barev se určuje srovnáváním referenčního zdroje a zdroje měřeného na normou definovaných vzorcích různých barev. Pro instalaci zdrojů světla do interiéru se vyžaduje, aby bylo dosaženo $R_a > 80$ (podle ČSN EN 12464).

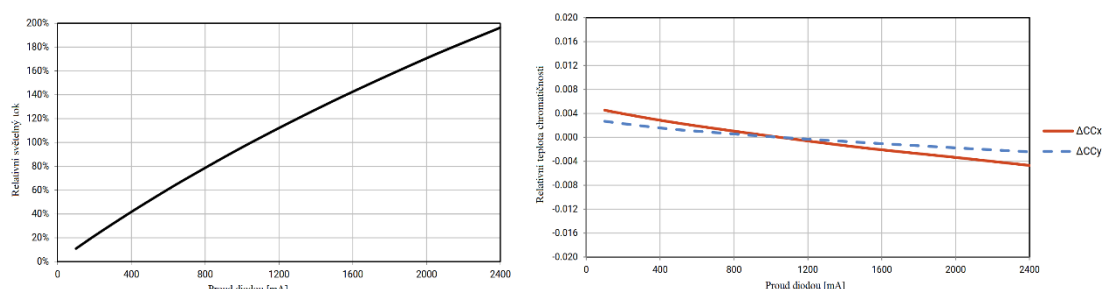
1.1.4 Vliv osvětlení na lidský organismus

Umělé osvětlení a přirozený sluneční svit se ve výše uvedených parametrech mohou často lišit. Lidskému organismu, který je evolucí adaptovaný na sluneční svit, může tato skutečnost způsobovat zdravotní potíže [32]. Nežádoucí složení světla může být na první pohled stěží postřehnutelné, ale zasahuje do metabolických procesů, které jsou řízeny denní dobou. Dále může způsobovat psychické problémy jako je podrážděnost či poruchy spánkového cyklu [12].

V praxi se proto začaly aplikovat různé metody, jak negativní vliv umělého osvětlení eliminovat. Osobní počítače zabarvují ve večerních hodinách obraz do červena. Na pracovištích bez přístupu denního světla se instaluje osvětlení s časově řízenou teplotou chromatičnosti [13]. To simuluje změny přirozeného světla během dne. V domácnostech je dnes možné si vybavit svítidla žárovkami s různým T_c tak, aby produktivní část dne bylo možné trávit v chladném osvětlení a odpočívat při světle s teplou chromatičností.

1.2 Regulace výkonu luminiscenčních diod

Hlavním specifikem LED jako zdrojů osvětlení je nutnost použít k jejich napájení zdroj konstantního proudu. Hlavním důvodem je fakt, že světelný tok diody je funkcí právě proudu, respektive proudové hustoty PN přechodu, nikoli napětí. S rostoucím proudem se také mírně posouvá spektrum záření, mění se tedy i parametry světla jako teplota chromatičnosti nebo index podání barev [14]. Příklad takových závislostí je níže:



Obrázek 7: Závislost světelného toku a teploty chromatičnosti na proudu LED[14]

Dalším důvodem pro napájení LED konstantním proudem je závislost VA charakteristiky diody na teplotě přechodu. Pokud se na diodu přiloží konstantní napětí, procházející proud způsobí zvýšení teploty PN přechodu. Křivka závislosti proudu na napětí se posune výše, konstantnímu napětí zdroje odpovídá pro vyšší teplotu vyšší hodnota proudu. Proud a teplota jsou v tomto případě spojeny kladnou zpětnou vazbou. Při špatně navrženém chlazení dojde tímto způsobem snadno ke zničení LED [14].

Zdrojů konstantního proudu je v dnešní době na trhu velký výběr. Z hlediska jejich principu je lze rozdělit do dvou velkých skupin: lineární a spínané. Lineární zdroje jsou výhodné v aplikacích, které buď nejsou náročné na účinnost nebo vyžadují pouze malý proud. Jejich další výhodou je nízká míra elektromagnetického rušení. Spínané zdroje jsou oproti lineárním schopné dodat velkou škálu výstupních proudů a napětí s malými ztrátami. Při jejich návrhu je ale nutné dodržet řadu pravidel a postupů, aby bylo elektromagnetické (EM) rušení vyzařované obvodem co nejvíce potlačeno. Pro tuto práci jsou vzhledem k jejímu zaměření relevantní spínané zdroje [15].

Spínané zdroje pracující v proudovém režimu se od těch napětíových liší v několika aspektech. Energie se během spínacího cyklu ukládá a odebírá z cívky. V sérii se zátěží zdroje je zapojen malý odpor. Úbytek napětí na tomto odporu sleduje regulátor, který otvírá a zavírá řídicí tranzistor podle potřeby. Výhodou tohoto uspořádání je jeho rychlejší odezva na změny zátěže i vstupního napětí, než je možné dosáhnout u napětíových zdrojů [20]. Mezi nevýhody pak patří problémy se stabilitou při střídě spínání přesahující 50 % pro aplikace se stálou spínací frekvencí. Dále platí, že malé proudy se tímto způsobem regulují velice nepřesně [15].

1.3 Parametry obvodu regulátoru

V této podkapitole budou uvedeny nejdůležitější parametry spínaných regulátorů a jejich vliv na celkové chování obvodu.

1.3.1 Spínací frekvence

Vhodně zvolená frekvence je základem návrhu každého dobře fungujícího regulátoru. S její hodnotou je spojena řada dalších parametrů obvodu. Současný trend je zvyšovat spínací frekvenci až do řádů jednotek MHz. Hlavním důvodem této snahy je přímá spojitost mezi kmitočtem a velikostí komponentů regulátoru, hlavně cívek a kondenzátorů. Při častějším spínání není totiž nutné uchovávat velké množství energie a obvod je tak možné minimalizovat. Ze studie vlivu kmitočtu na parametry obvodu [16] od Texas Instruments TPS54317 je vyjmuta tabulka č. 2:

Tabulka 2: Srovnání komponentů regulátoru pro různé spínací frekvence [16]

Frekvence [kHz]	Kondenzátor [μF]	Pouzdro kondenzátoru	Cívka [μH]
350	47	1206	3,5
700	22	0805	2,2
1600	10	0603	1,0

Negativní aspekty zvyšování frekvence jsou pak především horší účinnost (v případě výše uvedeného TPS54317 o 5 % mezi nejnižší a nejvyšší frekvencí [16]) a s tím související velké tepelné ztráty, které je nutné v návrhu zohlednit. Další neopomenutelný dopad má frekvence na EM rušení obvodu. Frekvence by vždy měla být navržena tak, aby nedocházelo k výraznému ovlivňování sousedních obvodů.

1.3.2 Cívka

Jak již bylo zmíněno výše, ve spínaném zdroji v proudovém režimu funguje cívka jako akumulární prvek, který do zátěže dodává energii při vypnutém stavu regulátoru. Tuto cívku je dobré volit na základě požadavků na vlastnosti výstupního proudu. V první řadě musí být cívka garantována na vyšší proud, než je ten dodávaný regulátorem. Indukčnost cívky je určena požadavky na frekvenci spínání a zvlnění výstupního proudu. Příklad výpočtu indukčnosti je následující [17]:

$$L = \frac{V_{Omax} * T_{off}}{i_{rp} * I_O} \quad (1.2)$$

kde L je indukčnost, V_{Omax} je maximální výstupní napětí, T_{off} doba vypnutí regulátoru, I_O výstupní proud a i_{rp} je zvlnění výstupního proudu určené jako podíl velikosti zvlnění špička-špička a I_O a nabývá hodnot 0 až 1 (v praxi se pohybuje typicky okolo 0,3 až 0,4).

V praxi existuje omezení reálnými parametry dostupných součástek. Pokud bude například zvolena nízká spínací frekvence pro dosažení co nejvyšší účinnosti, dostupné cívky s potřebnou indukčností bude možné použít pouze pro velmi malé proudy čistě z toho důvodu, že daná součástka by byla neprakticky velká. A i když se na trhu malé množství výkonových cívek s $L > 1$ mH vyskytuje, ve většině případů jde o varianty nestíněné, které pak fungují jako vysílač na frekvenci regulátoru a je nutné jejich rušení zohlednit při návrhu mechanické části zařízení [18].

1.3.3 Spínací tranzistor

Spínací tranzistor je další ze součástek, jejíž výběr silně ovlivňuje kvalitu výsledného zdroje. Nejčastěji se v současné době používá tranzistor typu MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor). Existují sice regulátory s integrovaným spínačem, jejich použití je ale omezené maximálním výkonem, jaký je schopné dané pouzdro integrovaného obvodu uchladit. I pro diskretní spínací MOSFET platí, že hlavním hlediskem pro jeho výběr jsou tepelné ztráty [19]. Je samozřejmé, že maximální napětí a proud na tranzistoru nesmí překročit výrobcem udávanou hranici. Při výběru správného tranzistoru se ale zohledňují i další parametry.

Ztráty na tranzistoru lze rozdělit na střídavé a stejnosměrné. Střídavé ztráty se na MOSFETu objevují během změny stavu „zapnuto“ a „vypnuto“. Tyto ztráty se tedy nejsnáze eliminují nízkou spínací frekvencí, kdy ke změnám stavu dochází méně často. Jak bylo ale několikrát zmíněno výše, nízká frekvence má negativní dopad na velikost a dostupnost použitých součástek [16]. Další možností je zkrátit dobu přechodu mezi jednotlivými stavy. Toho se docílí výběrem tranzistoru s co nejnižším nábojem hradla. Malý náboj se rychle nabije i vybijí a ztráty jsou eliminovány na minimum.

Stejnoseměrné ztráty se u tranzistoru objevují pouze ve stavu „zapnuto“. Jde o ztráty způsobené odporem kanálu R_{DSon} . Pro omezení těchto ztrát je nutné vybrat tranzistor,

který má kanál s co nejmenším odporem.

Reálný MOSFET bude v sobě mít i další zdroje ztrát, jako jsou hradlové ztráty a ztráty na substrátové diodě ve stavu „vypnuto“, ty však lze v tomto případě zanedbat [19].

2 PRAKTICKÁ ČÁST

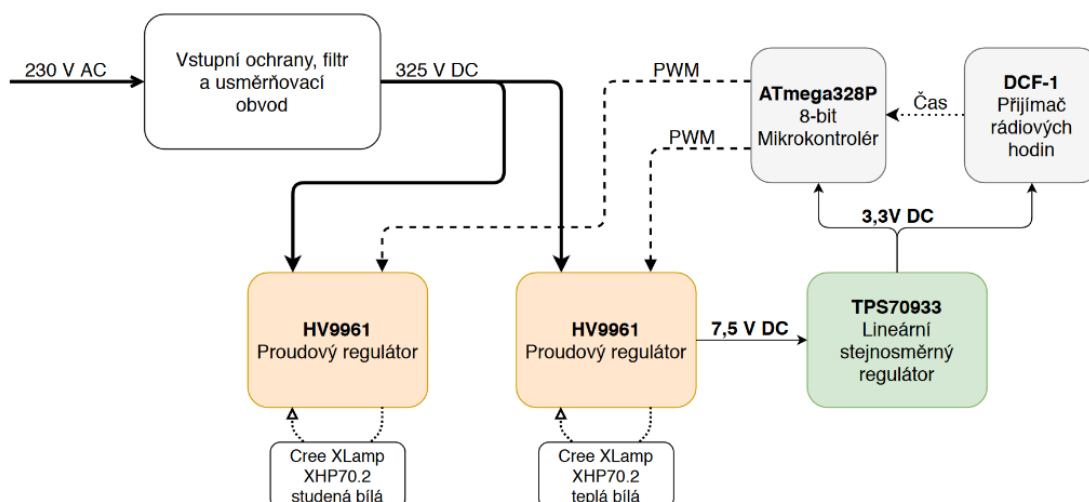
V této kapitole bude rozebrán praktický návrh řešení zadání práce. Jedná se o zdroj světla s luminiscenčními diodami o příkonu 30 W napájený ze síťového napětí. Tento zdroj bude schopen regulovat teplotu chromatičnosti světla, a to jak manuálně, tak i automaticky.

2.1 Návrh napájení

Pro napájení obvodů ze síťového napětí 230 V se v praxi velmi často používá izolovaných spínaných měničů AC/DC (tzv. fly-back topologie). Ty je možné dnes nalézt ve zdrojích pro osobní počítače, v nabíječkách nebo ve zdravotnických přístrojích. Základem těchto obvodů je transformátor, který je spínán takovým způsobem, že na sekundárním vinutí se nachází požadované malé napětí. Zároveň slouží jako ochranný prvek proti kontaktu se síťovým napětím. Tyto transformátory si každý výrobce AC/DC měničů navrhuje podle svých aplikací a je obtížné sehnat kompatibilní dvojici transformátor-regulátor. Proto bylo pro realizaci této práce zvoleno alternativní řešení. Tím je obvod HV9961 od výrobce Microchip, který pracuje ve velkém rozsahu vstupních napětí, jmenovitě od 8 V do 450 V DC. Při použití tohoto obvodu stačí napětí ze sítě pouze usměrnit a přivést na vstup regulátoru.

2.1.1 Upořádání obvodů

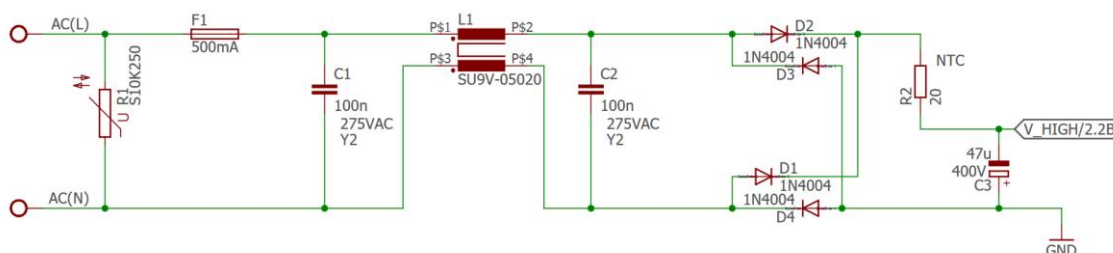
Aby bylo možné splnit požadavky na regulaci teploty chromatičnosti, bylo zvoleno zapojení obsahující dva regulátory, jeden pro teplou bílou a druhý pro studenou. Nastavením intenzity jednotlivých složek pak lze přesně regulovat jak celkový světelný tok, tak i teplotu vyzařovaného světla. Celkové uspořádání obvodů v zařízení je znázorněno na blokovém schématu na obrázku 8.



Obrázek 8: Blokové schéma zařízení

2.1.2 Vstupní obvod

Na vstupu celého zařízení je obvod, jehož účelem je usměrnit střídavé napětí 230 V. Dále musí zabezpečit odstranění nežádoucího rušení spínaného zdroje a zároveň ochránit další části obvodu před poškozením. Schéma tohoto obvodu je na obrázku 9:



Obrázek 9: Vstupní usměrňovací obvod

Na vstupních svorkách je varistor R1, který zbytek obvodu chrání před přepětím na napájecím napětí. Následuje tavná pojistka F1. Její hodnota byla nastavena následovně:

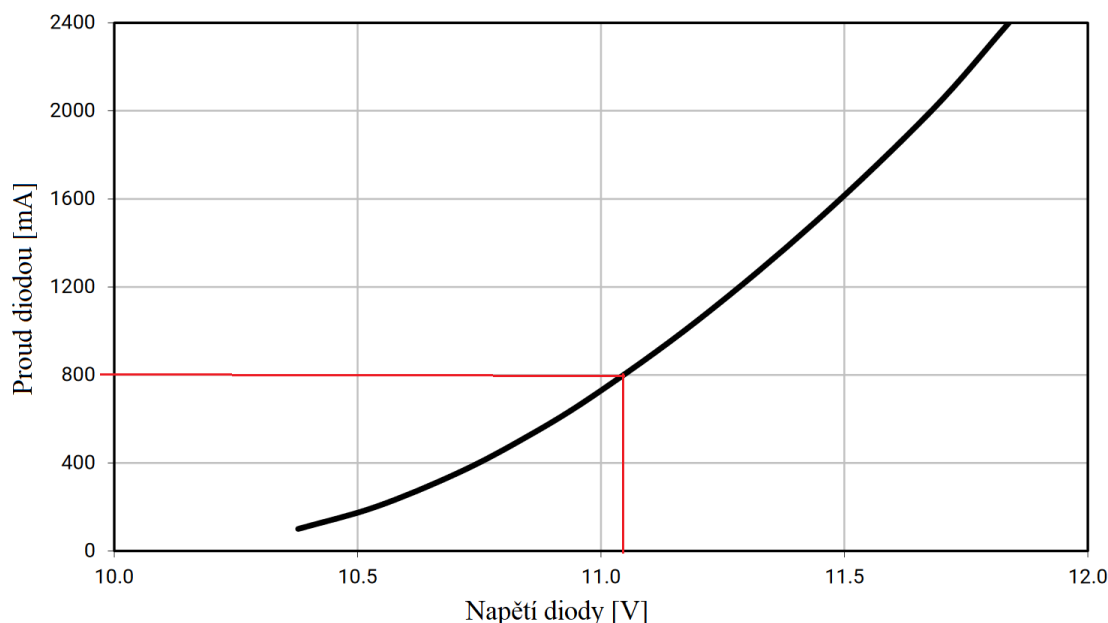
$$I_{fmin} = \frac{P}{U_{AC}} = \frac{30}{230} = 130 \text{ mA} \quad (2.1)$$

kde I_{fmin} je minimální proud, který musí pojistka propustit, P příkon zařízení a U_{AC} střídavé vstupní napětí. Protože při zapnutí celého zařízení může skokově proud překročit tuto hodnotu při nabíjení všech vnitřních kapacit, byla zvolena hodnota s dostatečně velkou rezervou. Dále je připojen filtr souhlasného napětí L1. Filtrační kondenzátory C1 a C2 slouží k vyhlazení vysokých frekvencí. Podstatné je, by byly vyrobeny z bezpečného dielektrika Y2, které se při poškození izoluje a neprorazí. Diody D1 až D4 tvoří usměrňovací můstek, za kterým je vyhlazovací kondenzátor C3. Protože jde o řádově vysokou kapacitu, je v cestě NTC termistor R2, který omezuje proudový ráz při prvním nabíjení.

2.1.3 Výběr vhodných diod

LED, které jsou v realizaci zadání práce použity jako zdroj světla, byly zvoleny s ohledem na několik klíčových parametrů. Musí být dostupné ve škále různých teplot chromatičnosti a být schopné pracovat v dostatečně vysokém výkonu tak, aby nebylo nutné spojovat do série příliš velké množství jednotlivých diod pro dosažení požadovaných 30 W.

Zvolené diody jsou z řady XLamp XHP70.2 předního výrobce CREE. Jedná se ve skutečnosti o pole 4 diod v uspořádání 2 * 2. Toto pole je možné zapojit buď v 6 V nebo 12 V variantě. Pro potřeby této práce bylo zvoleno 12 V uspořádání. Volt-Ampérová charakteristika je na obrázku níže:



Obrázek 10: VA charakteristika XPH70.2 [14]

Červeně je vyznačen zvolený pracovní bod. V tomto bodě platí pro jedno diodové pole následující hodnoty výkonu a maximálního světelného toku (ten je určen jako součin výkonu LED a konstanty udávané výrobcem v katalogovém listu diody [14]):

$$P_1 = I_{LED} * U_{LED} = 0,8 \text{ A} * 11,05 \text{ V} = 8,84 \text{ W} \quad (2.2)$$

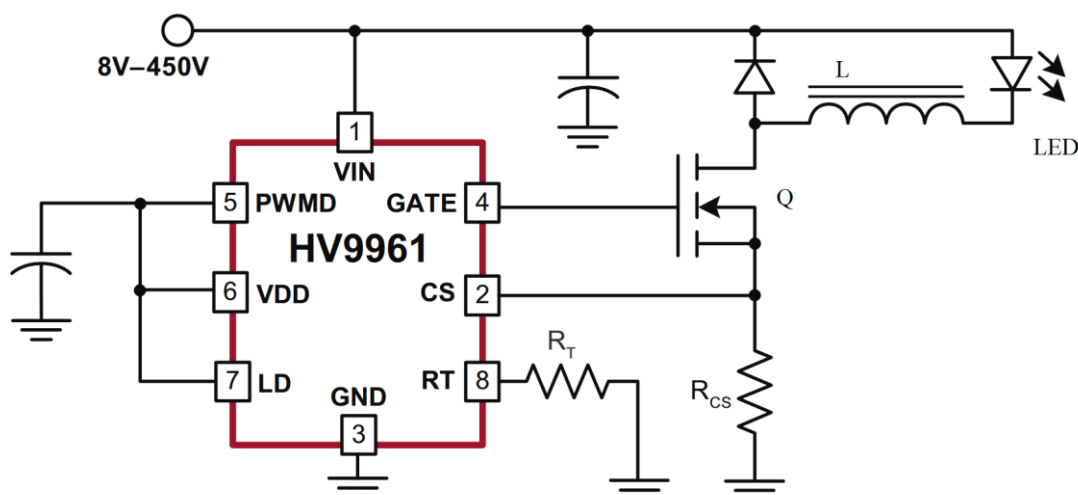
$$\Phi_1 = P_1 * 181 \text{ lm} * \text{W}^{-1} = 8,84 \text{ W} * 181 \text{ lm} * \text{W}^{-1} = 1600 \text{ lm} \quad (2.3)$$

Pro sériové zapojení 3 LED polí pak bude celkový výkon $P_3 = 26,5 \text{ W}$ a celkový maximální světelný tok $\Phi_3 = 4800 \text{ lm}$.

2.1.4 Regulátor

Pro regulaci proudu diodami byl použit obvod HV9961. Hlavním důvodem je jednoduchost celého obvodu díky širokému rozsahu vstupního napětí. Jedná se o integrovaný řídicí obvod pro LED pracující v režimu konstantní doby vypnutí.

Sledovanou výstupní veličinou je průměrný proud. Výhodou tohoto režimu je, že zátěž je automaticky chráněna proti vysokým hodnotám proudu. Jakmile totiž výstupní proud dosáhne prahové hodnoty, dojde k vypnutí zdroje na předem nastavenou dobu. Frekvence spínání je pak proměnlivá a závisí na konkrétní zátěži. S tím je spojená vysoká stabilita pro střidu i nad 50 % [20].



Obrázek 11: Typické zapojení obvodu s HV9961 [17]

Na obrázku 11 je znázorněno typické zapojení regulátoru proudu LED s tímto integrovaným obvodem. Funkce jednotlivých vývodů jsou následující:

- VIN – Vstupní napájecí napětí 8 V až 450 V
- CS – vstup pro snímání proudu
- GND – vývod společné země integrovaného obvodu
- GATE – výstup pro řízení spínacího tranzistoru
- PWMD – vstup pro stmívání pulzně šířkovou modulací
- VDD – výstup vnitřního regulátoru 7,5 V
- LD – vstup pro stmívání stejnosměrným napětím
- RT – vstup pro připojení časovacího rezistoru

Skutečné hodnoty jednotlivých komponentů byly určeny pomocí vztahů dodaných výrobcem v katalogovém listu integrovaného obvodu. Jako první byla vypočtena hodnota odporu snímajícího proud:

$$R_{CS} = \frac{0,275 \text{ V}}{I_{LED}} = \frac{0,275 \text{ V}}{0,8 \text{ A}} = 0,34375 \dots \Omega \quad (2.4)$$

kde R_{CS} je hodnota odporu a I_{LED} proud luminiscenčními diodami. Z proud snímajících odporů dostupných v době realizace práce byla vybrána hodnota $0,36 \Omega$. Proud, který nastaví tento odpor je pak $I_{LED} = 0,764 \text{ A}$.

Hodnota odporu R_T nastavuje dobu vypnutí regulátoru, která pak přímo ovlivňuje velikost cívky L . T_{OFF} je nutné nastavit s ohledem na několik parametrů. Větší výkony není žádoucí spínat s frekvencemi výrazně překračujícími 50 kHz. Nízké frekvence, tím pádem vysoké hodnoty doby vypnutí, však přináší nutnost použít velmi velké tlumivky, které musí zároveň snést vysoký proud (jak z pohledu výkonových ztrát, tak i nasycení

magnetického pole). Největší dostupná indukčnost pro proud 0,8 A byla v době přípravy práce 1,3 mH. Pro cívku a časovací odpor platí následující vztahy:

$$R_T[k\Omega] = (T_{OFF}[\mu s] - 0,3) * 25 \quad (2.5)$$

$$L = \frac{V_{OUT_MAX} * T_{OFF}}{0,4 * I_{LED}} \quad (2.6)$$

V regulátoru tedy bude použito $L = 1,3 \text{ mH}$ a $R_T = 300 \text{ k}\Omega$.

Poslední součástí, kterou bylo nutné vybrat se zvýšenou pečlivostí je spínací tranzistor typu MOSFET. Z doporučení výrobce regulátoru nesmí náboj hradla přesáhnout 25 nC. Dále musí tranzistor fungovat i ve vysokém napětí a vést proud minimálně 1 A. Zvolen byl produkt firmy Infineon IPN60R3K4CE. Shrnutí klíčových parametrů níže v tabulce:

Tabulka 3: Výběr spínacího tranzistoru

Parametr	Požadavek	IPN60R3K4CE
V_{DS}	600 V min.	650 V
I_{MAX}	1 A min.	2,6 A
Q_G	25 nC max.	4,6 nC

Protože se v této práci uvažuje se zatížením interního stabilizátoru regulátoru zdrojem pro mikrokontrolér (viz. 2.2.1 níže), bylo nutné snížit nežádoucí výkonové ztráty na regulátoru předřazením Zenerových diod, jak pro podobné účely doporučuje katalogový list. Pro dosažení dostatečné rezervy zatížení regulátoru byly použity dvě diody s $V_Z = 120 \text{ V}$ v sérii.

Všechny ostatní komponenty byly převzaty ze zapojení vývojové sady HV9961DB [17].

2.2 Návrh ovládací logiky

Aby bylo možné nastavovat úroveň světelného toku a také teplotu chromatičnosti záření, bylo zapojení regulátoru LED doplněno mikrokontrolérem, který signálem s pulzně šířkovou modulací (dále PWM) nastavuje přesnou hodnotu proudu luminiscenčními diodami. Pro tuto aplikaci byl využit 8-bitový kontrolér ATmega328P, známý z rozšířeného kitu Arduino Uno. Hlavními důvody jsou snadná dostupnost, nízká cena a velké množství již zaběhaných aplikací. Platforma Arduino je velmi rozšířená a je pro ni dostupné velké množství knihoven, modulů apod.

2.2.1 Napájení kontroléru

Mikrokontrolér je tomto případě napájen pomocí výstupu VDD regulátoru HV9961, který poskytuje stejnosměrné napájení 7,5 V. Snížení na 3,3 V je realizováno pomocí lineárního regulátoru napětí TPS70933 od firmy Texas Instruments. Regulátor má pevný výstup a je vhodný právě pro nízkopřikonové aplikace, jako je napájení mikrokontroléru. Konkrétní hodnota napětí byla zvolena s ohledem na použití přijímacího modulu

rádiových hodin DCF-1.

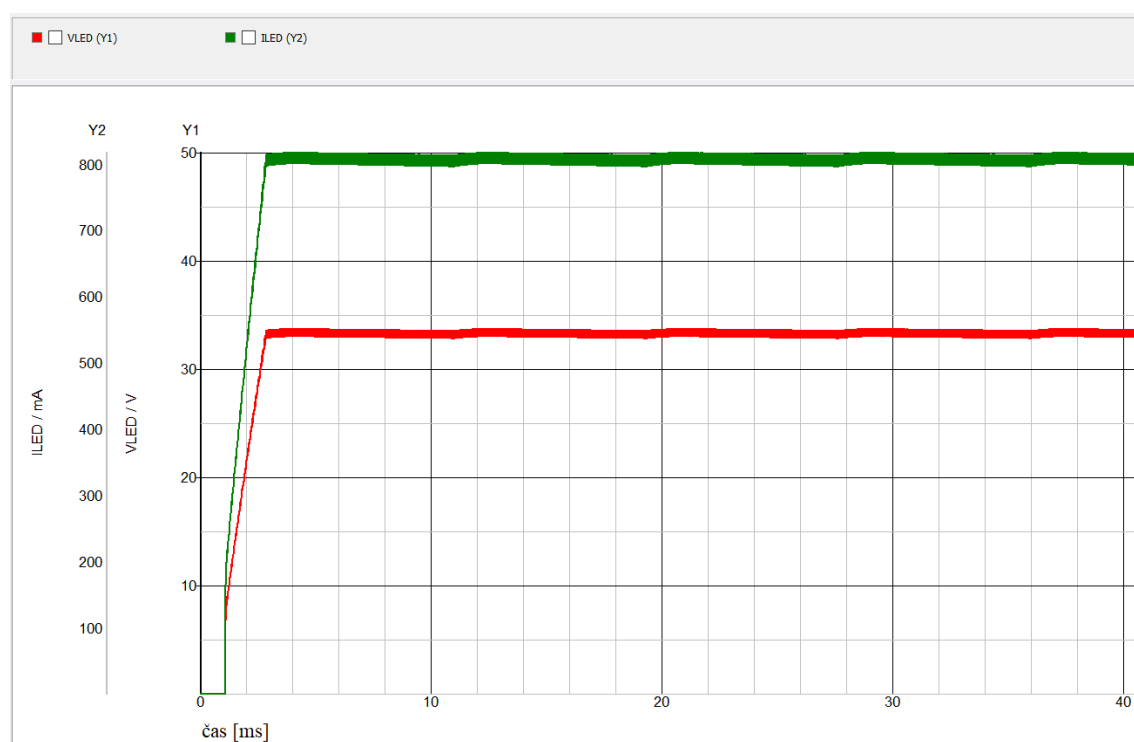
2.2.2 Konfigurace kontroléru

ATmega328P nabízí velké množství konfigurací, které umožňují nastavit si jeho chování přímo pro danou aplikaci. V tomto případě byl při volbě jednotlivých parametrů kladen důraz především na jednoduchost. Shrnutí nastavení je uvedeno níže, detailní rozbor následuje v samostatné podkapitole v sekci Realizace:

- Oscilátor – interní kalibrovaný RC oscilátor 8 MHz
- RESET signál – 10k Ω pull-up, 100nF debounce kondenzátor
- Reference AD převodníku – napájecí napětí
- Aktivované periferie TC1, TC2, RTCC

2.3 Simulace regulátoru

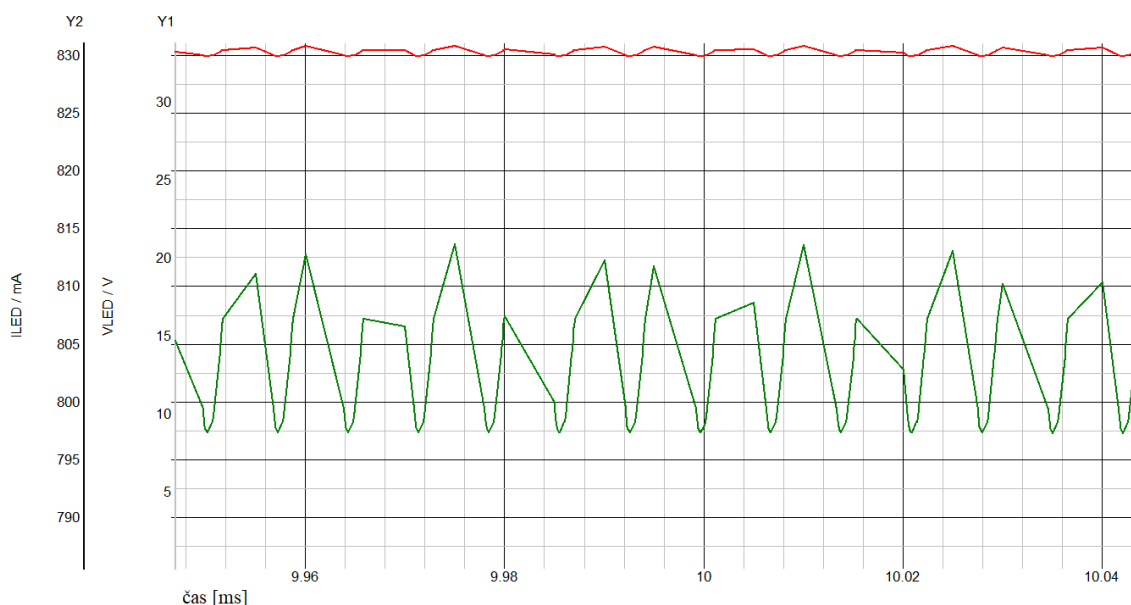
Aby byla ověřena správnost návrhu regulátoru LED, byl celý obvod nasimulován v prostředí MPLAB Mindi. Toto prostředí již obsahuje přednastavený obvod s HV9961, byly pouze upraveny hodnoty některých veličin, aby schéma v simulaci odpovídalo navrženému obvodu. Výsledky simulací jsou uvedeny níže.



Obrázek 12: Časový průběh napětí a proudu diodami po startu regulátoru

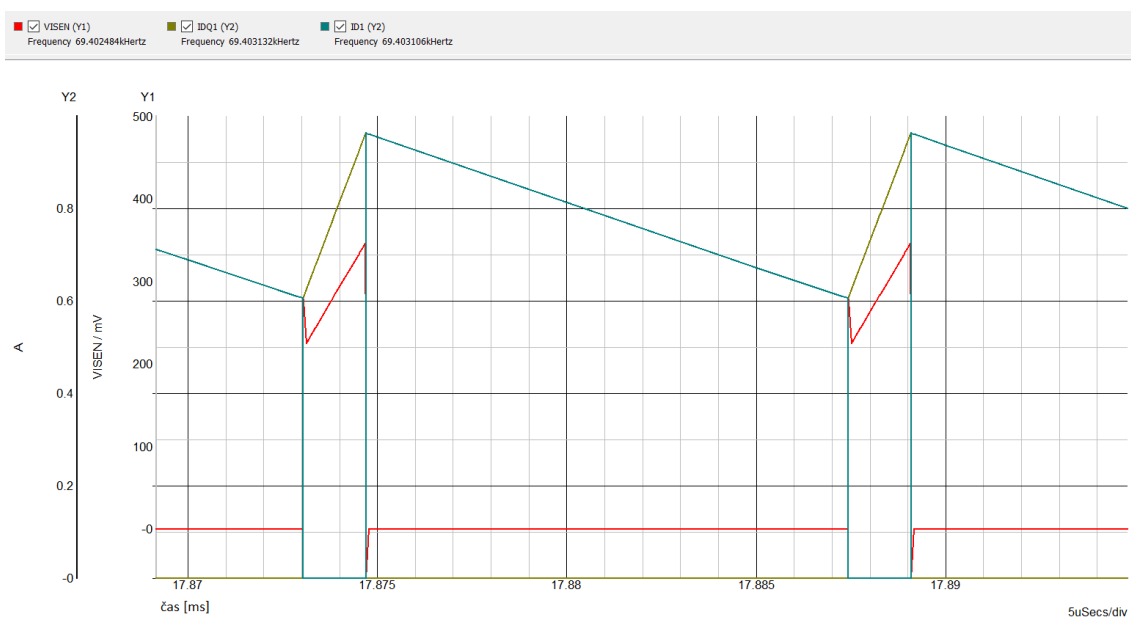
Na obrázku č. 12 jsou vyznačeny průběhy napětí a proudu LED v prvních 40-ti milisekundách po startu regulátoru. Červeně je vyznačeno napětí, hodnoty lze odečíst na ose Y1, zeleně pak je vyznačen proud, hodnoty na ose Y2. Je patrné, že obvodu trvá přibližně 1,5 ms než začne vykonávat svou funkci. Z detailu obou průběhů v obrázku 13 je patrné, že zvlnění výstupního proudu (a tedy i napětí) je řádově výrazně menší, než je

hodnota průměrného proudu. Špičková hodnota zvlnění proudu nepřesahuje 20 mA. Pro jmenovitý proud 800 mA to znamená 2,5 % rozkmit. V katalogovém listu regulátoru [17] je pro výstupní proud uvedena přesnost 3 %, což lze vyložit, že návrh funguje správně.



Obrázek 13: Detail průběhu proudu (zelená, Y2 – výřez 790 až 830 mA) a napětí (červená, Y1) diodami

Dále byl zkoumán průběh spínání proudu. Hlavním cílem bylo zjistit, jestli průběhy odpovídají očekávání a pokusit se vyčíst frekvenci spínání. Výsledek je na obrázku 14. Červeně je vyznačeno napětí na R_{CS} s hodnotami na svislé ose Y1. Zeleně pak proud recirkulační diodou, modře proud kanálem spínacího tranzistoru. Oběma proudům odpovídá svislá osa Y2.



Obrázek 14: Detail spínacího cyklu (17,870 až 17,895 ms)

Z výsledků simulace je patrné, že napětí na snímacím rezistoru nepřekračuje výrazně hodnotu 300 mV, což je žádoucí. Dále je zřejmé, že se proud, který teče diodami a cívkou přelévá mezi tranzistorem a recirkulační diodou podle očekávání. Frekvence, kterou z průběhů odečetl MPLAB je přibližně 70 kHz. Konstantní čas vypnutí je odporem R_T nastaven na 12,3 μ s. To znamená, že regulátor funguje se střídou podle následující rovnice:

$$D = 1 - \frac{12,3\mu s}{f^{-1}} = 1 - 12,3 * 70 * 10^{-3} = 0,184 \sim 18,4\% \quad (2.7)$$

3 REALIZACE

V této kapitole jsou popsány jednotlivé kroky přípravy funkčního vzorku výše navrženého zapojení. Nejprve je uveden postup realizace elektroniky, pak následuje popis sestavení algoritmu, jež zařízení obsluhuje. Veškerý návrh DPS probíhal v prostředí Autodesk Eagle 8.

3.1 Realizace HW

Jak již bylo několikrát uvedeno výše, výkonové elektroluminiscenční diody jsou komponenty, které mají specifické nároky na použití. Především se jedná o nutnost tyto součástky chladit. Z tohoto důvodu byla fyzická realizace práce rozdělena na dvě desky plošných spojů – s jádrem FR4, která bude obsahovat zdroje a mikrokontrolér a pak s hliníkovým substrátem čistě pro osazení LED. Spojení těchto dvou desek je realizováno trojicí drátů – společnou anodou a katodou teplých a studených diod.

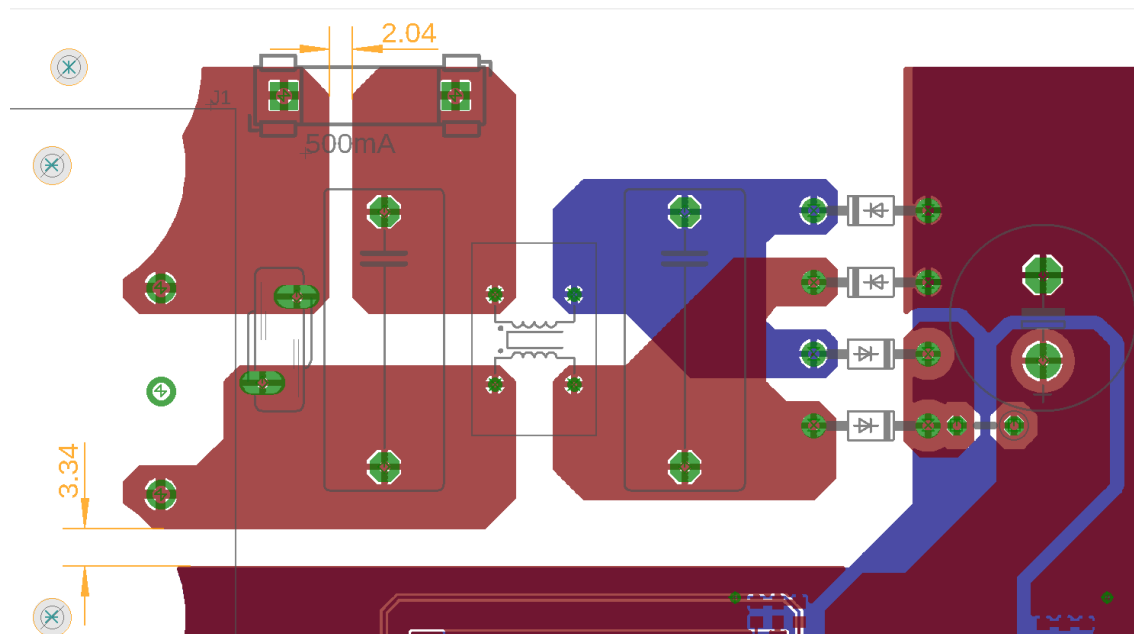
3.1.1 Návrh DPS na substrátu FR4

Nejprve bude popsán návrh DPS na bázi FR4. Rozměry této desky byly zvoleny s ohledem na zajištění bezpečné praktické manipulace, snadného umístění všech komponent a jednoduchého dodržení dostatečných isolačních vzdáleností na 127 x 127 mm (tedy 5 x 5 palců). Později se ukázalo, že zapojení je možné bezpečně realizovat i na menší ploše, nicméně vzhledem k tomu, že nebylo nutné vejít se do předem definovaných rozměrů, byly ponechány tyto rozměry.

Při pohledu do schémat v příloze je možné zapojení rozdělit do 3 částí, pro které budou platit odlišné zásady při návrhu DPS.

První část začíná vstupní svorkou pro síťové napětí a končí vyrovnávacím elektrolytickým kondenzátorem C3. V této části se mohou vyskytovat dvě odlišná napětí: 230 Vst (50 Hz) a 325 Vss. Obě tato napětí spadají do kategorie nízkých napětí. Jsou jednak životu nebezpečné a mohou způsobit i majetkové škody. Z tohoto důvodu byly pro tuto část použity co největší bezpečné vzdálenosti mezi jednotlivými signály, viz obrázek 15 níže. V obrázku jsou zvýrazněny dvě kóty. V levé části je zvýrazněna nejkratší fyzická vzdálenost mezi mědi ve vstupním filtru a zemní plochou, která je 3,34 mm. V horní části je okótována nejužší vzdálenost uvnitř tohoto segmentu – 2,04 mm. Tyto vzdálenosti vychází především z praktických omezení rozměrů použitých

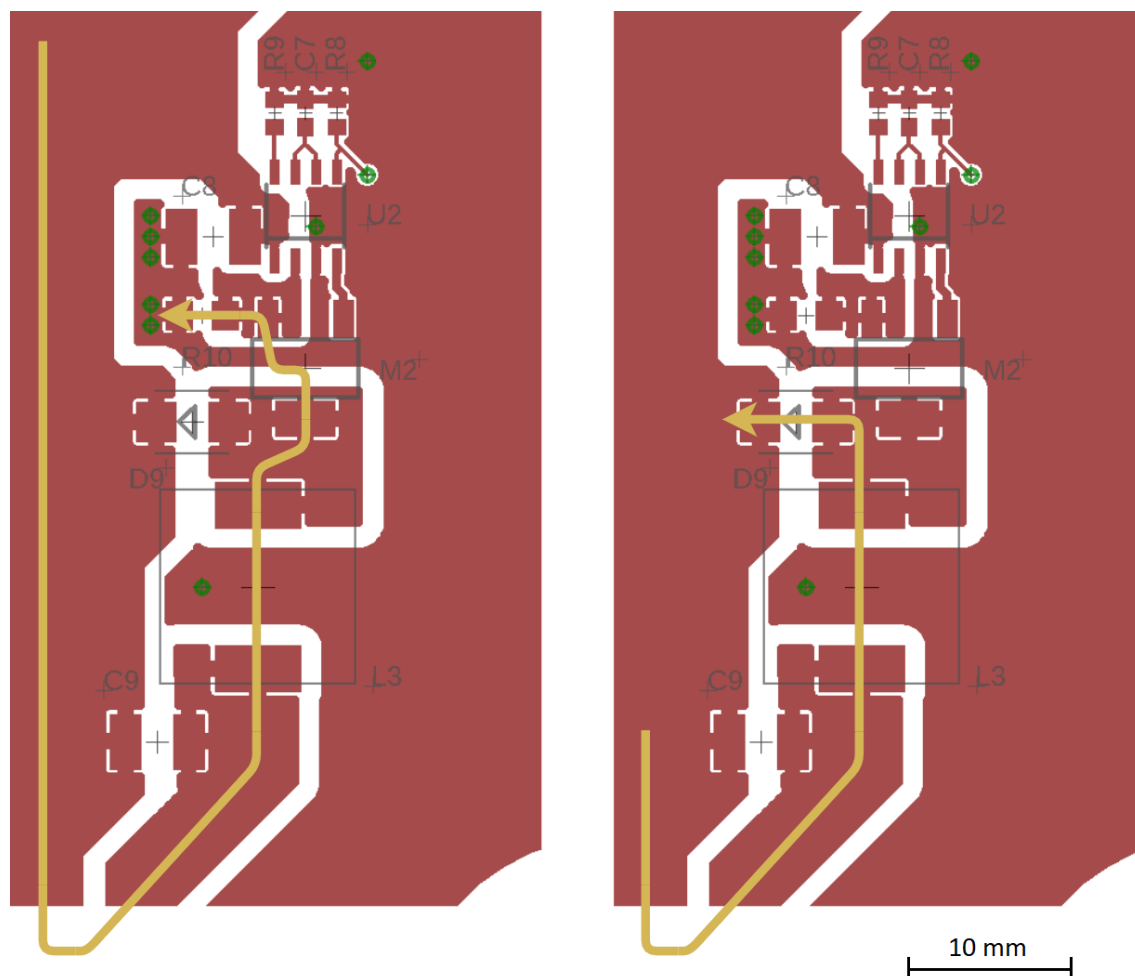
součástek. Za zmínku ovšem stojí právě vyhlazovací elektrolytický kondenzátor v pravé části obrázku 15. Na jeho vývodech se napětí pohybuje v okolí 325 Vss. Pro celou DPS byla pro spoje, kde se nachází toto napětí nastavena izolační vzdálenost 0,6 mm (resp. 24 mils). Udává se, že pro izolaci 1kV je v běžných podmínkách dostačující vzdálenost 1 mm. Zvolený odstup 0,6 mm je tedy téměř dvojnásobkem nejnižšího minima. Pokud by nastalo zhoršení podmínek použití, jako je zvýšená vlhkost či prašnost, je žádoucí zesílit ochranu např. vrstvou speciálního laku.



Obrázek 15: Detail DPS v části vstupního filtru

Při kreslení této část však bylo na druhou stranu nutné zohlednit množství mědi, které ve výsledném motivu zůstane na substrátu. Aby nedošlo k příliš výraznému nepoměru mezi plochou měděné vrstvy v této části a zbytku DPS, bylo pro vytvoření spojů mezi součástkami použito polygonů. Pokud by místo polygonů byly použity běžné spoje, mohou nastat problémy během výroby DPS při zesilování měděné vrstvy a výsledná deska může být mírně zakřivená.

Druhá specifická část zapojení obsahuje oba spínané zdroje, které řídí teplé a studené LED. Vzhledem k tomu, že se jedná o specifické zapojení, které pracuje s nízkým napětí 325 Vss, platí zde pro spoje s tímto napětí, podobně jako v předchozí části, izolační vzdálenost 0,6 mm. Dále je však nutné zohlednit skutečnost, že spínané zdroje mohou vydávat silné elektromagnetické rušení. Proto byl kladen silný důraz na dodržení zásad pro návrh DPS se spínanými zdroji. Především je nutné zajistit co nejužší umístění jednotlivých součástí zdroje, aby v žádné části spínacího cyklu nevznikaly příliš velké proudové smyčky. To je znázorněno v detailu na obrázku 16.



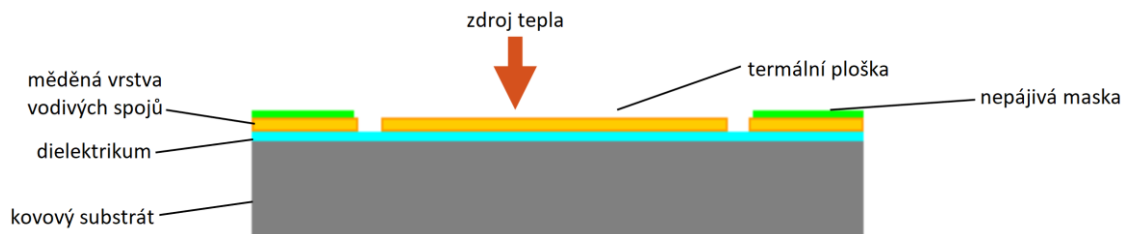
Obrázek 16: Tok proudu (vyznačen žlutě) v sepnuté (vlevo) a rozepnuté (vpravo) části spínacího cyklu zdroje

Zároveň byly zdroje umístěny tak, aby samotný mikrokontrolér byl oddělen co možná největší zemní plochou, která případné rušení zachytí a svede.

Třetí, poslední sekce, obsahuje lineární stabilizátor mikrokontroléru, tlačítka resetu a volby módu, indikační diody a konektor pro bezdrátový modul DCF-1. V této části se při běžném provozu nenachází nebezpečné napětí. Všechny vzdálenosti byly nastaveny na 0,25 mm (10 mils). V praxi se běžně používají i hodnoty nižší, pro zajištění snadné výrobitelnosti byla zvolena tato hodnota.

3.1.2 Návrh DPS na hliníkovém substrátu

Dlouhodobé působení velkého množství tepla má za následek degradaci vlastností všech polovodičových součástek, LED nevyjímaje. Proto byly diody použité v této práci umístěny na oddělenou desku plošných spojů tvořenou hliníkovým jádrem. DPS s kovovým jádrem (nejčastěji hliník či měď) se v praxi používají právě pro montáž tepelně nejvíce namáhaných komponent. Řez typickou kovovou DPS je vyobrazen níže.



Obrázek 17: Řez DPS s kovovým substrátem

Tabulka 4 popisuje typické vlastnosti výše vyobrazených vrstev. Konkrétní hodnoty závisí na zvoleném výrobcí, pro přehled jsou však uvedena čísla dostačující.

Tabulka 4: Vlastnosti vrstev kovové DPS [23]

vrstva	tloušťka [μm]	tepelná vodivost [W/mK]
Bezolovnatá pájka	75	58
Měděná vrstva	70	398
Dielektrikum	100	2,2
Hliníkové jádro	1588	150

Aby bylo možné exaktně určit vliv hliníkového substrátu na odvod tepla z pouzdra součástky, je nejprve nutné určit tepelný odpor DPS [23]:

$$\theta_{DPS} = \theta_{pájka} + \theta_{Cu} + \theta_D + \theta_{Al} \quad (3.1)$$

Pro jednotlivé tepelné odpory pak platí následující rovnice [23]:

$$\theta = \frac{l}{k * A} \quad (3.2)$$

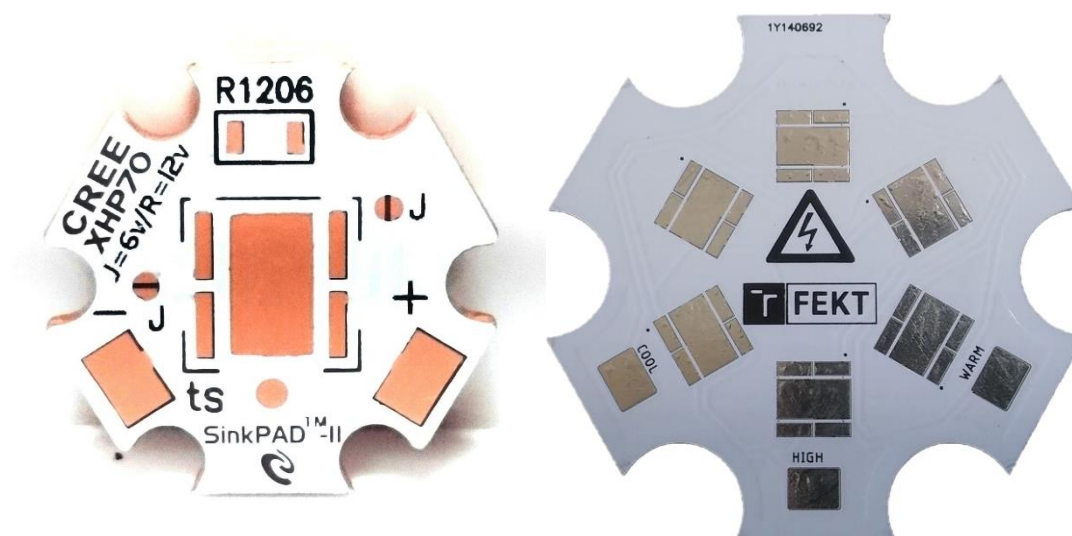
kde l je tloušťka vrstvy, k její tepelná vodivost a A plocha zdroje tepla. Pouzdro použitých LED má rozměry $7 * 7 \text{ mm}$, celkem je v obvodu šestkrát (tříkrát teplá bílá a tříkrát studená), zdroje tepla se tedy nachází na ploše 294 mm^2 . Po dosazení je získán následující vztah [24]:

$$\theta_{Al} = \frac{75}{58 * 294} + \frac{70}{398 * 294} + \frac{100}{2,2 * 294} + \frac{1588}{150 * 294} \cong 0,2 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (3.3)$$

Pro srovnání, tepelný odpor pouzdra (PN přechod – pájený spoj) použitých diod je $0,9 \text{ } ^\circ\text{C/W}$. Při použití desky z materiálu FR4 je tepelný odpor substrátu ve stejných podmínkách více než stokrát vyšší ($\theta_{FR4} = 27 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ [24]). Nejenže tedy použití DPS na bázi hliníku výrazně zjednoduší odvod nežádoucího tepla ze součástek, při nahlédnutí do katalogového listu výrobce použitých LED je možné zjistit, že pokud je tepelný odpor substrátu menší nebo roven jedné (což v tomto případě platí, $\theta_{Al} = 0,2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$), není nutné proud diodami omezovat až do doby, než teplota okolí překročí $120 \text{ } ^\circ\text{C}$ [14].

V dalším kroku bylo nutné určit tvar a plochu desky. Pro demonstrační účely doporučuji výrobcí elektroluminiscenčních diod použití DPS pro jednotlivé komponenty.

Příklad takové desky je na obrázku vlevo, vpravo pak výsledný návrh pro osazení 6 LED.



Obrázek 18: DPS typu „hvězda“, běžně dostupný vzorek (vlevo) [25], výsledný návrh (vpravo)

Jedná se o tzv. „hvězdu“ – šestiúhelník s vykrojenými vrcholy. Plocha tohoto útvaru má pro produkty výrobce CREE doporučenou hodnotu 270 mm² [24]. Pro 6 součástek je to tedy 1620 mm². Pro určení šířky a délky útvaru byly použity vztahy pro plochu šestiúhelníku (3.4), délku hlavní úhlopříčky (3.5) a délku vedlejší úhlopříčky (3.6):

$$A = \frac{3 * \sqrt{3}}{2} * a^2 \quad (3.4)$$

$$d_h = 2 * a \quad (3.5)$$

$$d_s = \sqrt{3} * a \quad (3.6)$$

Po dosazení vychází, že délka hrany a je rovna 25 mm. Deska by tedy měla rozměry 50 * 45 mm. V praxi je však nutné zohlednit několik aspektů. Za prvé, při použití stejného tvaru „hvězdy“ se čistá plocha šestiúhelníku zmenší o výkroje na vrcholech. Za druhé, stále platí, podobně jako u první DPS této práce s napájecími zdroji, že je žádoucí dodržet dostatečné izolační vzdálenosti. Pro usnadnění vytváření vodivých spojů došlo tedy během návrhu desky ke zvětšení rozměrů v obou směrech o 17 mm. Výsledné rozměry obrysu hliníkové desky pro osazení LED byly 58 * 67 mm.

3.2 Realizace FW

V této podkapitole následuje rozbor vývoje ovládacího programu, jenž běží v mikrokontroléru ATmega328. Pro připomenutí, účelem je kombinace stříd dvou šířkově modulovaných signálů nastavit intenzitu teplé a studené složky světla a tím i výslednou teplotu chromatičnosti. Tuto změnu musí být možné provádět manuálně, zároveň však musí být umožněno automatické nastavení v závislosti na denní době.

Nejprve je nutné zmínit, že pro účely vývoje software této práce bylo použito

prostředí Arduino IDE. Aby bylo možné snadno program snadno do kontroléru v zařízení nahrát a následně jej ladit, byla ATmega nejprve vybavena Arduino zavaděčem „ATmega328 on a breadboard (8 MHz internal clock)“. Jak název napovídá, je tento zavaděč určen právě pro použití s mikrokontroléry přímo na DPS jejich určené aplikace, nikoli v Arduino kitu. Jako zdroj hodinového signálu byl použit interní kalibrovaný oscilátor o frekvenci 8 Mhz.

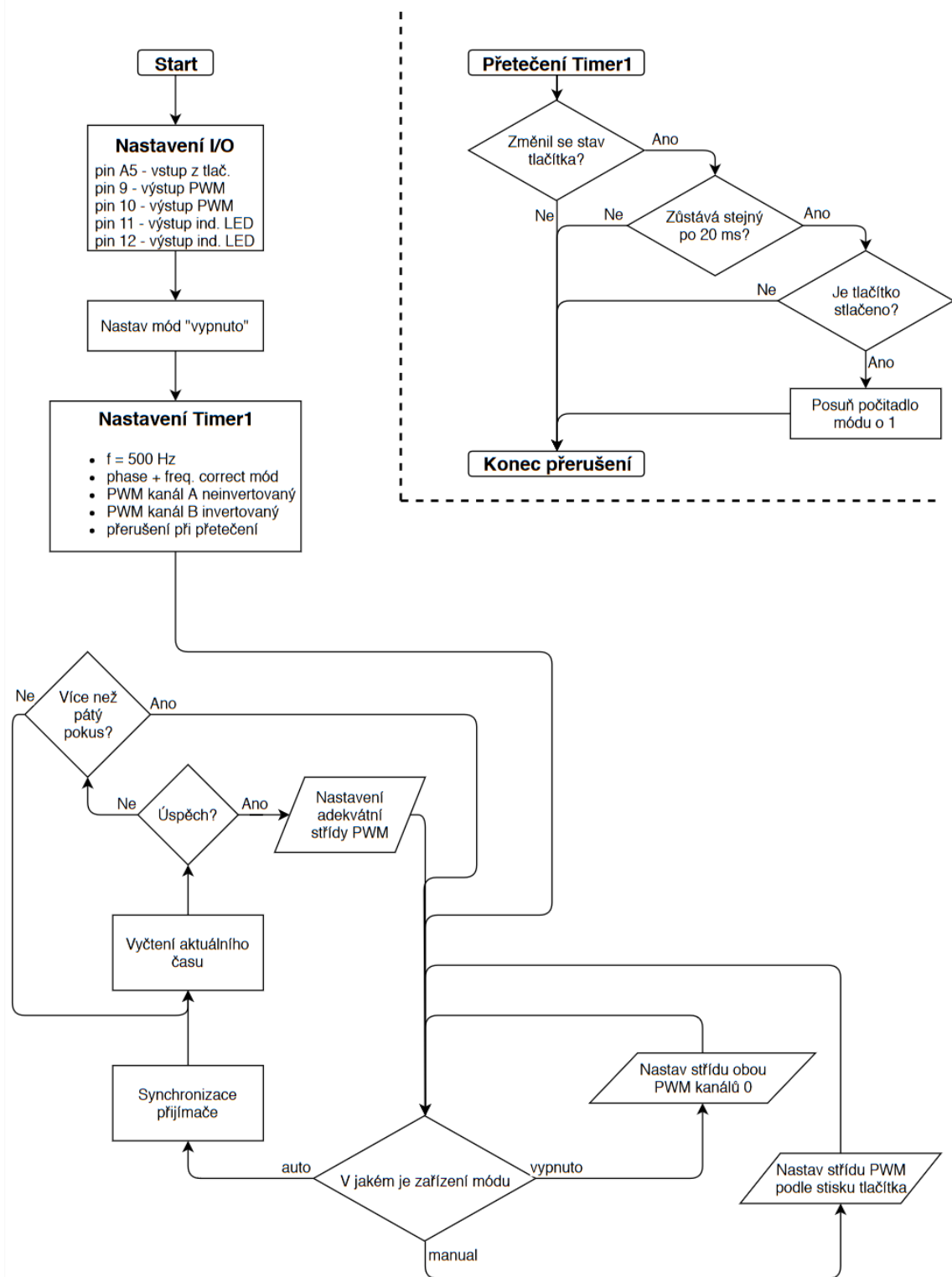
Následující řádky obsahují slovní popis vývojového diagramu vyobrazeného na následující straně. Jedná se grafické znázornění všech úkonů, které kontrolér provádí. Pro zlepšení čitelnosti schématu bylo použito až na výjimky výhradně slovního popisu jednotlivých kroků. Kompletní kód je možné nalézt mezi přílohami této práce. Samotný diagram je rozdělen do tří segmentů. Největší z nich zabírá levou polovinu. Jedná se o znázornění inicializace kontroléru a popis činnosti hlavní programové smyčky. Další dvě části diagramu v pravé polovině pak obsahují instrukce, které jsou vykonávány během přerušení.

Inicializace programu probíhá následujícím způsobem. Nejprve jsou nastaveny vstupní a výstupní piny kontroléru. Pro generování signálu PWM byl zvolen časovač Timer 1, jehož kanály A a B se nachází na PORTu B, PINy 1 a 2. Vzhledem k tomu, že celý firmware byl programován v prostředí Arduino IDE, odkazuje se vývojový diagram na čísla příslušných pinů desky Arduino UNO, která použitou ATmegou obsahuje. Zbývající vstupy a výstupy jsou charakteru GPIO (general purpose input output – univerzální vstupně-výstupní pin) a nejsou svázány s žádnou konkrétní periferií. Proto byly zvoleny s ohledem především na jejich polohu na pouzdře kontroléru a jeho umístění na DPS.

Dále byla deklarována a definována proměnná „mód“. Její hodnota určuje chování celého zařízení. Jedná se o integer, který nabývá hodnot 0 až 8. Přehled všech stavů je k nalezení v tabulce 5:

Tabulka 5: Přehled módů zařízení

Hodnota	Režim	Chování
0	vypnuto	Indikační LED zhasnuté, hlavní LED zhasnuté
1	automatický	Indikační LED „auto“, teplota světla nastavena dle času
2	manuální	Indikační LED „man“, teplota světla 3000 K
3	manuální	Indikační LED „man“, teplota světla 3450 K
4	manuální	Indikační LED „man“, teplota světla 3900 K
5	manuální	Indikační LED „man“, teplota světla 4350 K
6	manuální	Indikační LED „man“, teplota světla 4800 K
7	manuální	Indikační LED „man“, teplota světla 5250 K
8	manuální	Indikační LED „man“, teplota světla 5700 K



Obrázek 19: Vývojový diagram

V následujících krocích inicializace dochází k zapnutí a konfiguraci časovače Timer 1. Timer 1 slouží za prvé jako zdroj PWM signálů a za druhé generuje při každém přetečení přerušování. Jeho frekvence je 500 Hz. Časovač pracuje v režimu „phase and frequency correct“, který je vhodný právě pro nízké kmitočty. Oba PWM kanály sdílí jednu střidu, kanál B je však oproti kanálu A inverzovaný. Tak je zajištěno, že řídicí signály de facto přepínají mezi teplou a studenou složkou a v ideálním případě nikdy nenastane situace, kdy obě budou aktivní v jednu chvíli. Tím je zajištěno že okamžitá spotřeba nikdy nepřesáhne hranici 30 W.

Po konfiguraci periférií vstoupí program do hlavní smyčky. Zde dochází k rozvětvení v závislosti na nastavení proměnné „mód“. Její počáteční hodnota je „0“, vše je tedy vypnuto. Pokud se nastavení změní na hodnoty odpovídající manuálnímu režimu, dojde k úpravě PWM signálu, aby stav zařízení odpovídal tabulce 5.

Pokud je zařízení uvedeno do režimu „automat“ (tedy mód je roven jedné), začnou být volány funkce z knihovny příslušící k modulu DFC. Nejprve je nutné provést synchronizaci přijímače rádiového signálu s vysílačem. Tento úkon je nejcitlivější na kvalitu příjmu, v nepříznivých podmínkách může trvat až desítky minut, v běžné praxi však maximálně dvě až tři minuty. Po úspěšné synchronizaci je proveden pokus o vyčtení aktuálního času. Zde může opět docházet ke vznikům chyb, proto je implementována smyčka, která získaná data ověřuje. Pokud jsou poškozená, dojde k novému odečtu. Aby zařízení nezůstalo v nekonečné smyčce, dojde po pěti neúspěšných pokusech k nové synchronizaci. Po úspěšném získání aktuálních údajů o čase a datu nalezne mikrokontrolér v předem nastavených polích vhodný poměr mezi teplou a studenou složkou pro danou denní dobu.

Při přetečení časovače Timer1, tedy každé dvě milisekundy, dojde k zavolání jeho příslušného přerušování. V tomto přerušování se kontroluje stav tlačítka a zjišťuje se, zda došlo ke stisknutí. Je zde převzat Arduino demonstrační příklad ošetření zámků, jediná změna je nastavení délky zpoždění na 20 ms. Pokud dojde k úspěšnému ověření, že tlačítko bylo zmáčknuto, dojde k navýšení hodnoty „módu“ o jedna. Pokud by měl však být roven číslu devět, dojde k jeho vynulování. Je nutné zmínit, že způsob, jak zjišťovat stav tlačítka je k dispozici více. Jedním z nich je volat specifické přerušování vždy při změně stavu na vstupu daného pinu. To ale vyžaduje odfiltrování zámků pomocí externích součástek, např. jednoduchým RC článkem. Pokud by bylo použito programového ošetření, vznikalo by až příliš mnoho nežádoucích přerušování generovaných překmitů. Další možnost je provádět kontrolu přímo ve smyčce programu. V tom případě by ale kontrolér musel vykonat ověřování stavu a překmitů v každém průběhu smyčkou a jeho čas by tak nebyl využit účelně. Při ověřování stavu vstupu v přerušování, jak je to implementováno v této práci, nedochází k plýtvání zdroji, obsluha zařízení však nemá šanci poznat rozdíl, neboť případné zpoždění je výrazně menší, než je rozlišovací schopnost běžného člověka.

3.3 Určení hodnot klíčových proměnných

Tato podkapitola se zaměřuje na dvě oblasti obslužného algoritmu, bez kterých by nebylo možné práci realizovat. První z nich je postup míchání dvou zdrojů různého bílého světla tak, aby bylo dosaženo výsledného zdroje s předem definovanými vlastnostmi. Ve

druhé části následuje určení vhodných časových intervalů pro jednotlivé teploty chromatičnosti v průběhu dne.

3.3.1 Míchání dvou LED světél různých barev

Vzhledem k široké paletě LED produktů na trhu se nabízí otázka, proč se vůbec mícháním barev zabývat. Velké množství součástek s různými spektrálními charakteristikami a světelnými toky dokáže bohatě pokrýt drtivou většinou nároků. Hlavním důvodem, který stojí za použitím světél složených z více různých diod stojí jejich cena. Výrobci součástek nemusí stíhat pružně reagovat na zvýšenou poptávku po konkrétních vlnových délkách či teplotách chromatičnosti. Výtěžnost součástek s příliš úzce specifikovanými parametry může být kvůli možnostem výroby nedostačující. Aby bylo zamezeno zbytečně vysokým výdajům nebo zpoždění kvůli nedostupným komponentům, je možné v aplikacích, které nejsou extrémně citlivé na výslednou spektrální charakteristiku, naradit řadu totožných LED vhodnou směsí jiných, mírně odlišných, které však ve výsledku budou produkovat světlo neodlišitelné od těch původních. Výrobci diod proto u svých produktů udávají tzv. „binning“ – tedy souřadnice sektoru barevného prostoru (např. CIE 1931, viz. strana 12), kde se daná součástka nachází. Zákazník si pak může snadno určit, které produkty lze kombinovat, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností světelného zdroje.

Pro konstrukci této práce byly pořízeny následující LED komponenty:

Tabulka 6: Přehled spektrálních parametrů použitých diod

Číslo součástky	XHP70B-00-0000-0D0HM430G	XHP70B-00-0000-0D0BN40E2
Teplota chromatičnosti	3000 K	5700 K
Min. světelný tok (25 °C) θ	1538 lm	1770 lm
CRI (min.)	80%	70%
CCx; CCy (CIE 1931)	0,4338; 0,4030	0,329; 0,342

Výrobce těchto součástek, firma Cree, vydala pro míchání více různých zdrojů světla na svých stránkách detailní návod [26]. Z matematického hlediska se využívá toho, že barva je definována třemi složkami X, Y a Z. Pro více zdrojů světla platí, že tyto složky jednotlivých zářičů je možné přímo sečíst. Výsledkem pak budou samostatné složky hotového zdroje. Aby bylo možné součet provést, převedou se nejprve hodnoty CCx, CCy a θ jednotlivých zdrojů na trichromatické použitím rovnic 3.7 až 3.9 [26].

$$X_n = CCx_n * \frac{\theta_n}{CCy_n} \quad (3.7)$$

$$Y_n = \theta_n \quad (3.8)$$

$$Z_n = \frac{\theta_n}{CCy_n} * (1 - CCx_n - CCy_n) \quad (3.9)$$

Pro trichromatické složky výsledného světelného zdroje pak platí [26]:

$$X_{mix} = X_1 + X_2 + \dots + X_n \quad (3.10)$$

$$Y_{mix} = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n \quad (3.11)$$

$$Z_{mix} = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n \quad (3.12)$$

Z těchto složek se nakonec určí hodnoty barevného prostoru CIE 1931 [26]:

$$CCx_{mix} = \frac{X_{mix}}{X_{mix} + Y_{mix} + Z_{mix}} \quad (3.13)$$

$$CCy_{mix} = \frac{Y_{mix}}{X_{mix} + Y_{mix} + Z_{mix}} \quad (3.14)$$

$$\theta_{mix} = Y_{mix} \quad (3.15)$$

Všechny výpočty byly provedeny v programu MS Office Excel. Nejprve bylo nutné určit, které teploty chromatičnosti bude zařízení během svého chodu nastavovat. Okrajové hodnoty jsou omezeny dílčími hodnotami použitých součástek, není možné získat mícháním součástek výslednou teplotu vyšší, než je nejvyšší teplota použitých diod. Totéž platí i pro nízké hodnoty. Záření se tedy bude pohybovat v intervalu od 3000 K do 5700 K. Po praktických testech bylo rozhodnuto, že tento interval se rozdělí na celkem sedm hodnot s rozestupy 450 K. Tak vznikne množina teplot, která dostatečně jemně pokrývá celou stupnici od teplé až po studenou bílou, ale je praktická i pro ruční regulaci. Při určování vhodných poměrů obou složek bylo pro každou teplotu postupováno tak, že jejich světelný tok, který vstupuje do výpočtů výše, byl určen jako součin běžného toku dané součástky z tabulky 6 vynásobený střídou (pro teplou bílou) nebo rozdílem po odečtení střídy od čísla jedna (pro studenou bílou). Touto metodou byly určeny hodnoty v tabulce 7, které lze také nalézt ve zdrojovém kódu v příloze.

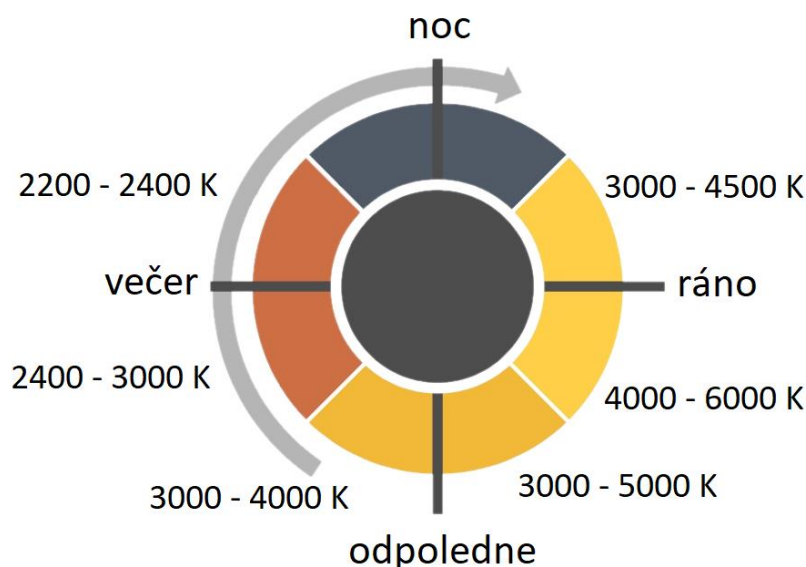
Tabulka 7: Souhrn hodnot pro míchání teplého a studeného světla

Výsledná teplota	CCx	CCy	střída (teplá)	střída (studená)
3000 K	0,4369	0,4040	100 %	0 %
3450 K	0,4081	0,3921	84 %	16 %
3900 K	0,3849	0,3795	63 %	37 %
4350 K	0,3662	0,3673	44 %	56 %
4800 K	0,3509	0,3562	27 %	73 %
5250 K	0,3384	0,3461	11 %	89 %
5700 K	0,3280	0,3371	0 %	100 %

3.3.2 Určení vhodných teplot chromatičnosti pro dané denní doby

Pro správné chování zařízení v automatickém režimu bylo nutné nastavit pro každou denní dobu adekvátní poměr teplé a studené složky, a zároveň definovat délku intervalů, během kterých budou zvolené hodnoty nastavené.

Biodynamickým osvětlením se v současné době již zabývá řada firem a na trhu existuje široká paleta hotových řešení [28][29]. Příklad jednoho z nich se nachází na obrázku 20 níže.

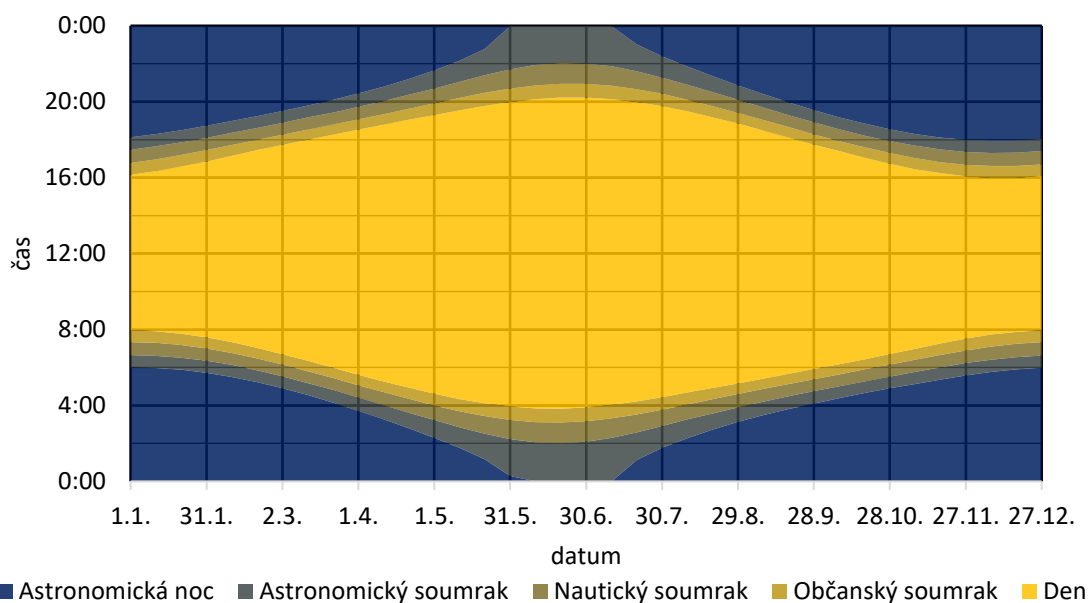


Obrázek 20: Příklad denního cyklu biodynamického osvětlení [27]

Jde o rozdělení denního cyklu do osmi intervalů o délce tří hodin. Ve většině aplikací se za počátek dne počátek dne považuje čas 6:00. Tato hodnota se v obrázku nachází v pravém horním kvadrantu. Čas pak postupuje ve směru hodinových ručiček. Hranice dalších intervalů pak jsou 9:00, 12:00 apod. až do 24:00 v levém horním kvadrantu. V čase od půlnoci do šesté ranní se žádné osvětlení neuvažuje. Toto schéma, včetně odpovídajících teplot, se opakuje u více dodavatelů tohoto typu osvětlení [27][28], proto bylo rozhodnuto využít pro účely práce podobného rozdělení s použitím hodnot teploty chromatičnosti z tabulky 7.

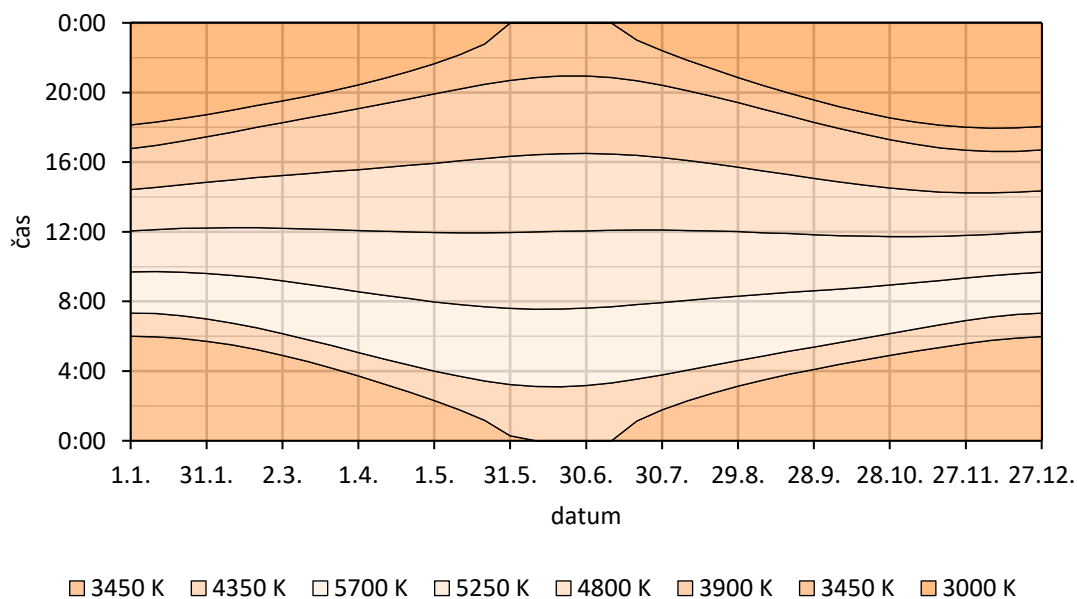
K určení hranic časových intervalů bylo zapotřebí nejprve stanovit změny ve východu a západu slunce během roku. Ty jsou vždy uvedeny v aktuálním vydání Hvězdárské ročenky [30]. Na obrázku 21 je jejich vizualizace pro kalendářní rok 2018.

Občanský soumrak (či úsvit) popisuje část dne, kdy slunce již zapadlo (nebo ještě nevyšlo), ale střed slunečního disku se nachází maximálně 6° pod obzorem. Když se slunce nachází mezi 6° a 12° pod obzorem, jedná se o nautický soumrak (nebo svítání). Poloha slunce v rozmezí od 12° do 18° pod obzorem se označuje jako astronomický soumrak a pro případy, kdy slunce klesne níže než 18° pod horizont, mluví se o astronomické noci [31]. Zajímavostí je, že v létě je patrné období, kdy v naší zeměpisné šířce astronomická noc nenastává vůbec.



Obrázek 21: Východy a západy slunce v roce 2018 [30]

Spojení časů a teplot proběhlo následujícím způsobem. Rozdělení dle obrázku 20 je platné pro průměrný den, tedy v okolí rovnodenností (konec března a září). 21. března 2018 vycházelo slunce v 6:01 a zapadalo v 18:11. Čas mezi východem a západem slunce byl rozdělen na 4 intervaly, pro rovnodennost jsou tyto intervaly každý v podstatě 3 hodiny dlouhý. Pro zbytek roku byly rozpočítány v poměru mezi východy a západy slunce platné pro daný den. Další dva intervaly vznikly spojením všech tří soumraků a svítání do jednoho. Od astronomického soumraku do půlnoci byl stanoven sedmý interval a od půlnoci do svítání pak osmý. Vizualizace intervalů se nachází na obrázku 22, konkrétní hodnoty jsou uvedeny v příloze.



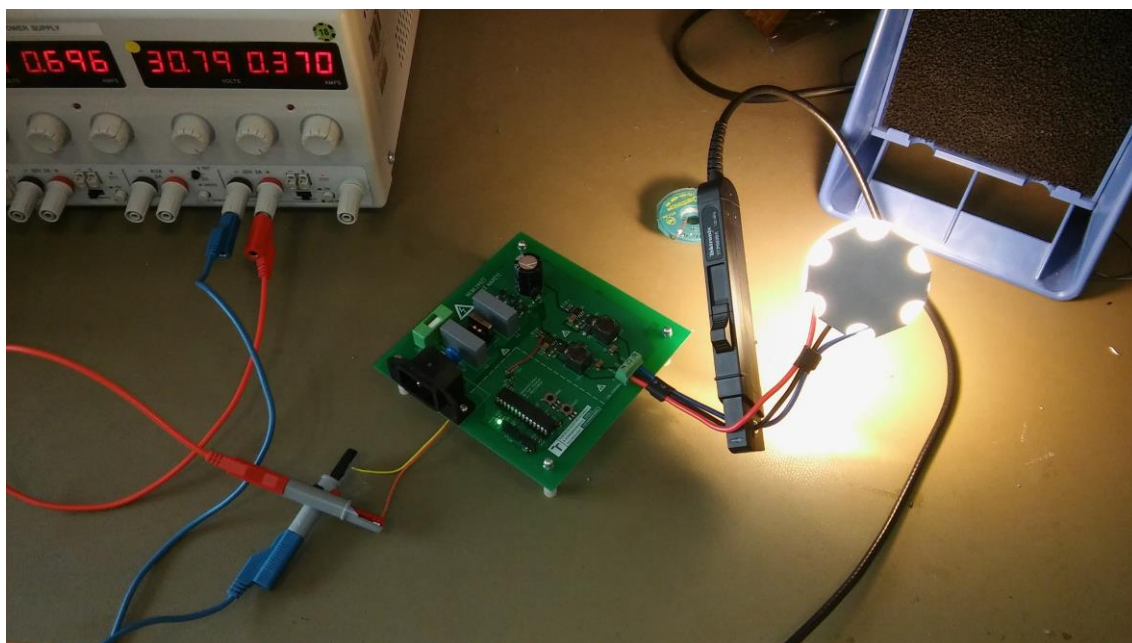
Obrázek 22: Rozložení intervalů teplot světla během roku

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro potřeby úplného uzavření experimentální části před odevzdáním této práce se nepodařilo zajistit včasné dodání dostatečně silné tlumivky L. Namísto 1,3 mH byly pro potřeby ověření funkce osazeno do obou zdrojů použity cívky 560 μH . Z rovnic 2.5 a 2.6 byla určena náhradní hodnota časovacího rezistoru $R_t = 118 \text{ k}\Omega$. Tato změna silně ovlivnila frekvenci spínání obvodu HV9961, dle simulací narostla z hodnoty 70 kHz (což už je na hranici použitelnosti pro zvolenou zátěž) na 150 kHz. Indukčnost 560 μH je příliš malá a proud by narůstal rychleji, než je regulátor schopen reagovat. Aby bylo možné provést testy zapojení, bylo jako napájení použito 30 V ss z laboratorního zdroje, které byly přivedeny na svorky elektrolytického kondenzátoru na výstupu usměrňovače. Vzhledem ke snížení vstupního napětí bylo nutné přemostit v každé větvi dvě ze tří LED čipů, aby výstupní napětí nepřesahovalo 75 % vstupního. Při překročení tohoto limitu dojde k omezení funkce regulátoru.

Měření bylo provedeno s těmito přístroji:

- TTI EL302RT TRIPLE POWER SUPPLY laboratorní zdroj
- Tektronix DPO 4034B digitální osciloskop
- Tektronix TCP0030A proudová sonda
- Tektronix TDP0500 rozdílová napěťová sonda



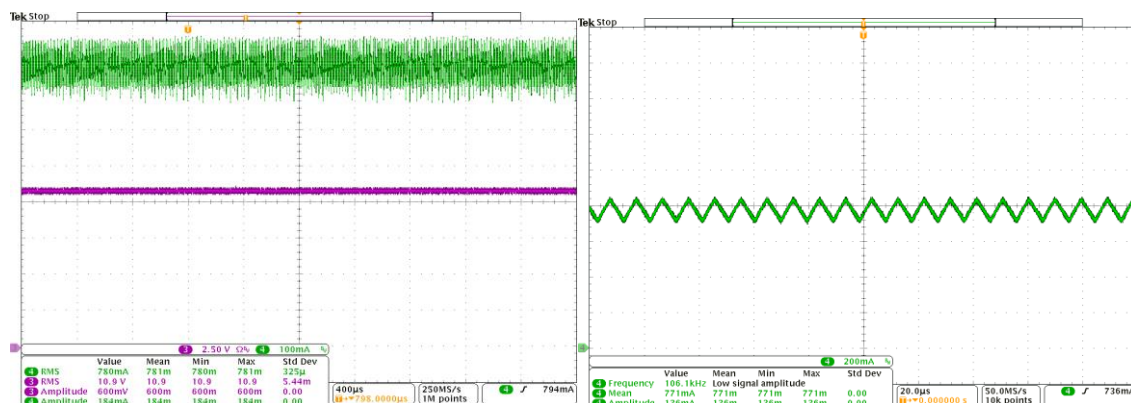
Obrázek 23: Foto zařízení a zapojení měřicích přístrojů

Následují snímky obrazovky z osciloskopu. Nejprve průběh proudu a napětí na LED při 100 % střídě. Vlevo na obrázku 24 je časová osa nastavena tak, aby bylo možné ověřit, že ve zdroji nedochází k rezonanci. Jeden horizontální dílek představuje 400 μs . Napětí je vyobrazeno fialovou barvou, rozlišení 2,5 V na dílek, proud zeleně, 100 mA na dílek. Z měření je patrné, že napětí na LED čipu je 10,9 V při proudu 780 mA. Tyto hodnoty odpovídají jak nastavení regulátoru, tak i VA charakteristice použitých diod. Umožňují také určit celkovou spotřebu zařízení. Z obrázku 23 lze určit spotřebu celého zařízení při

použití jedné LED. Samotný příkon jednoho čipu lze určit z pracovního bodu VA charakteristiky změřeného v obrázku 24. Příkon celého zařízení pak bude následující:

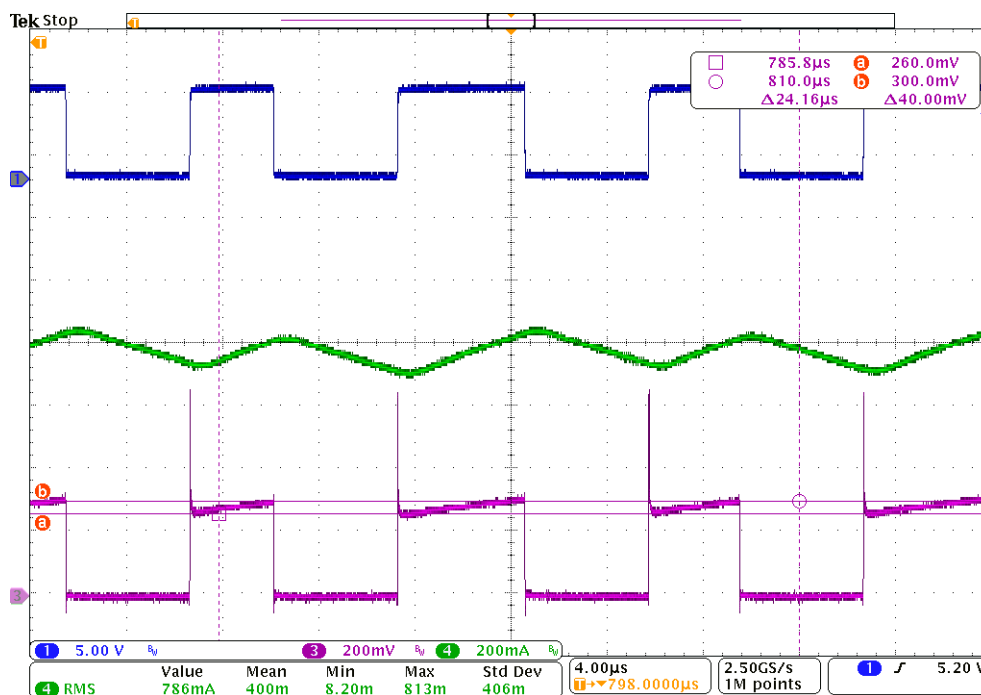
$$P_{celk} = 30,79 * 0,37 + 2 * 10,9 * 0,78 = 28,4 \text{ W} \quad (4.1)$$

Celkový příkon zařízení tedy nepřesáhne limit 30 W stanovený zadáním.



Obrázek 24: Proud (zeleně) a napětí (fialově) na LED (vlevo) a detailní průběh proudu (vpravo)

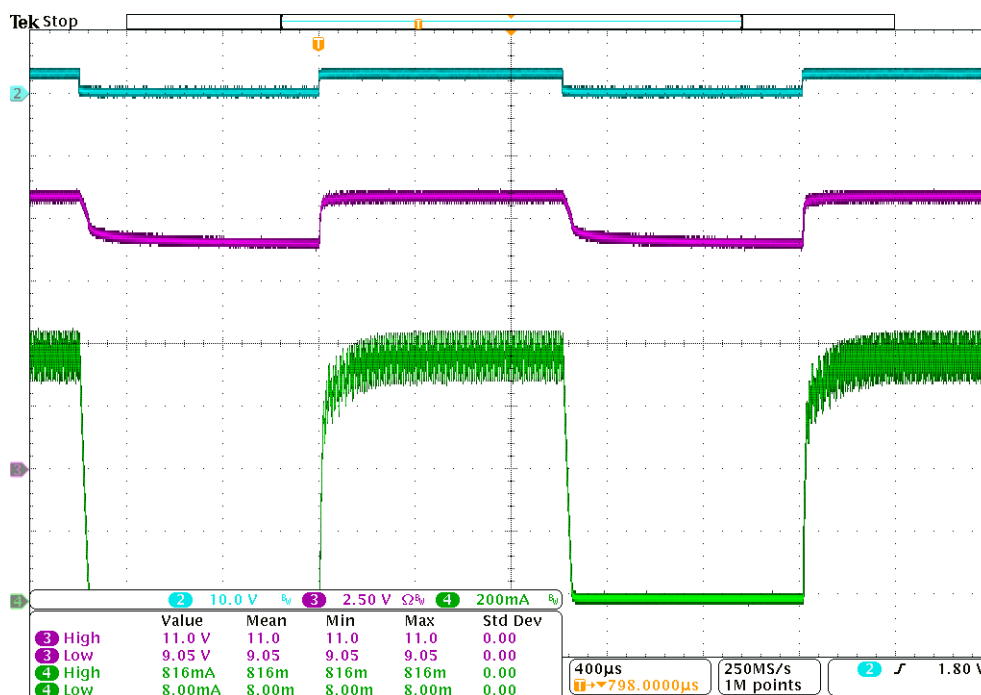
Dále byla ověřena funkce spínání tranzistoru. Na obrázku 25 jsou zaznamenány celkem 3 průběhy. Časová základna je nastavena na 4 μ s na dílek Modře je zachycen výstup z regulátoru, který řídí hradlo spínacího tranzistoru. Logická 0 odpovídá 0 V, log1 pak 7,5 V, rozlišení osy 5 V/dílek. Zde je dobře vidět, jakým způsobem probíhá regulace „constant off-time“, konkrétně přesné nastavení střidy spínání podle aktuální potřeby zátěže. Doba, kdy je hradlo v nule je pevně nastavena rezistorem R_t , délka pulzu se mění v čase.



Obrázek 25: Detail spínání regulátoru zobrazující signál hradla (modře), proud LED (zeleně) a napětí snímacího rezistoru (fialově)

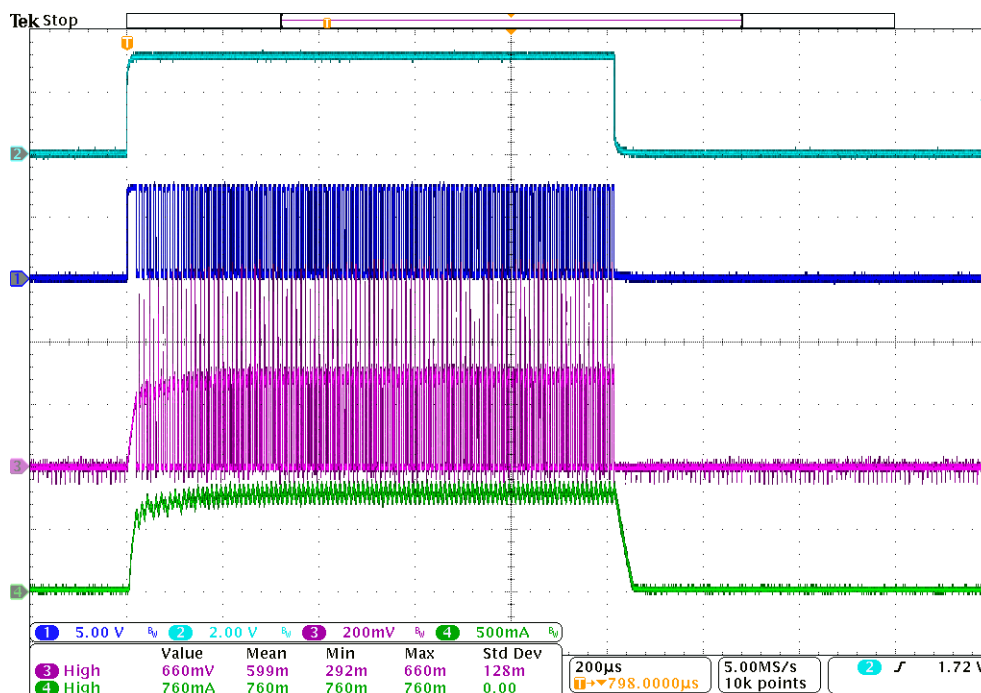
Zelenou barvou je zachycen proud zátěží s rozlišením 200 mA na dílek. Je vidět, že dle aktuální střidy i proud mírně kolísá v čase, jeho efektivní hodnota 786 mA ale odpovídá nastavení. Fialově je zachyceno napětí na snímacím rezistoru R_{CS} . Překmit při otevření je pravděpodobně způsoben použitou sondou. Podobné záškuby byly při použití stejných měřicích přístrojů pozorovány i v minulosti. Částečně je možné se jich zbavit, když se zem sondy spojí se zemí zařízení co nejbližše měřenému bodu, ale v tomto případě byla náběžná hrana velmi příkrá a měřené napětí poměrně malé, vzniku malého překmitu tedy nešlo již zabránit. Rozlišení tohoto průběhu je 200 mV/dílek. Frekvence spínání nebyla přímo v tomto kroku změřena, protože zobrazené průběhy jsou velmi krátké a výsledek by byl ovlivněn změnami délky pulzu. Při zachycení většího množství period byla frekvence spínání určena na 105 kHz. Tato hodnota se liší od simulované kvůli použitému napájecímu napětí. Při chodu zařízení z 30 V ss je během sepnutí regulátoru na cívce zhruba desetkrát menší napětí než při napájení ze sítě, trvá tedy delší dobu, než proud naroste na hodnotu, která způsobí rozepnutí tranzistoru.

V dalším kroku měření byla ověřena funkce regulace jasu pomocí signálu s pulzně šířkovou modulací. Aby byla zaručena správná funkce PWM stmívání, je žádoucí, aby délka pulzu dovolila zdroji se stabilizovat. Následují průběhy při střídě 50 %. Nejprve je jako obrázek 26 vložen pohled na proud a napětí na LED se stejnými parametry jako výše, napětí fialově, 2,5 V/dílek a proud zeleně, 200 mA/dílek. Modře je pro ilustraci průběh vstupního PWM signálu. Pokud je PWM v log0, neteče žádný proud, ale na LED svorkách je zbytkové napětí výstupního kondenzátoru regulátoru. To je menší než prahové napětí PN přechodů na čipu, tedy nestačí k jejich otevření. Kondenzátor se tedy nemá, jak vybit. Při přechodu modrého signálu do log1 trvá asi 150 μ s, než se hodnota ustálí. Při použití PWM o frekvenci 500 Hz to znamená, že nejmenší střída by neměla klesnout pod hodnotu 7,5 %. Dle tabulky 7 bylo pro míchání složek použito nejmenší střidy 11 %, což poskytuje dostatečnou rezervu k ustálení.



Obrázek 26: Průběh napětí (fialově) a proudu (zeleně) při použití 50% PWM (modře)

Na obrázku 27 je vynesena detail jednoho PWM cyklu s časovou základnou 200 μ s/dílek. Průběhy jsou zde celkem čtyři: světlemodrá zastupuje řídicí signál PWM (2 V/dílek), tmavomodrá spínací signál hradla tranzistoru (5 V/dílek), fialová napětí na snímacím rezistoru (200 mV/dílek) a zelená proud zátěží (500 mA/dílek). Zde stojí za zmínku především přechodové jevy na začátku a konci ovládacího pulzu. Po jeho přechodu do log1 je tranzistor otevřen nezvykle dlouhou dobu, dochází zde k ukládání energie do setrvačných prvků, jako je tlumivka a výstupní kondenzátor. Délka tohoto prvního pulzu je téměř 20 μ s. Po skončení pulzu přestane regulátor otevírat tranzistor prakticky okamžitě, LED jsou však stále v provozu, protože součástky, které se během prvního dlouhého pulzu nabíjely, nyní ještě dodávají do zátěže zbytek své energie. Proud diodami klesne k nule až po 50 μ s.



Obrázek 27: Detail průběhů spínání tranzistoru (tmavomodře), napětí snímacího odporu (fialově) a proudu zátěží (zeleně) při použití 50 % PWM (světlemodře)

5 ZÁVĚR

V první části semestrálního projektu byla nastíněna problematika použití LED jako zdrojů umělého osvětlení. Byly představeny současné trendy v konstrukci výkonových luminiscenčních diod a také výzvy, se kterými se výrobci a návrháři potýkají. Jde především o odlišnosti mezi umělým a přirozeným osvětlením a jejich dopadem na lidský organismus. Teoretická část práce pak pokračovala představením metodiky regulace výkonových LED a shrnutím nejdůležitějších parametrů v obvodech regulátorů spolu s jejich praktickými dopady.

Druhá kapitola se zabývá návrhem regulátoru osvětlení s LED, jehož příkon nepřesáhne 30 W, dle zadání. Ten umožňuje nastavit intenzitu osvětlení a zároveň nabízí i možnost regulovat teplotu chromatičnosti vyzařovaného světla. Správnost návrhu byla ověřena simulací obvodu. Výsledné parametry regulátoru dokládají, že zvolené a vypočtené hodnoty umožňují správnou funkci zapojení. Přesnost výstupního proudu byla zjištěna 2,5 %, což je hodnota srovnatelná s údaji od výrobce. Střída spínání hlavního tranzistoru se pohybuje v okolí 18 %. V literatuře se uvádí, že pro zaručení stability spínaného proudového zdroje, nesmí její hodnota přesáhnout 50 %, což navržený obvod splňuje.

Ve třetí kapitole pojednává tato práce o realizaci zapojení. Kvůli problematice chlazení použitých vysokovýkonných LED bylo rozhodnuto o rozdělení elektroniky na dvě desky plošných spojů. Napájecí zdroje a řídicí mikrokontrolér byly umístěny na DPS s jádrem FR4. Při návrhu této desky byla zohledněna řada požadavků vyplývajících z obvodů, které jsou na této desce umístěny. Jedná se především o bezpečné izolační vzdálenosti pro práci s nízkým napětím. Dále bylo nutné vhodnou volbou umístění součástek zaručit, aby oba spínané zdroje vyzařovaly do okolí co nejméně nežádoucích elektromagnetických vln. Nejcitlivějším komponentem je v tomto ohledu mikrokontrolér, který byl umístěn od zdrojů rušení co možná nejdál. Druhá deska byla navržena na hliníkovém jádru, aby zajistila účinný odvod tepla z LED čipů.

Řídicí algoritmus, který byl nahrán do mikrokontroléru, byl navržen tak, aby co nejvěrněji reflektoval přirozené osvětlení během dne. Vzhledem ke různým délkám dne a noci během kalendářního roku došlo k implementaci těchto změn. Tím došlo k zaručení věrného zdroje světla za všech okolností.

Pro provedení experimentální části bylo nutné dosáhnout kompromisu mezi úplností měření a časem vyhotovení práce. Vzhledem k omezené dostupnosti vhodných výkonových tlumivek byly nakonec použity takové, které umožnily činnost zařízení pouze v laboratorních podmínkách. Po modifikaci regulátoru a zátěže proběhlo měření charakteristik při použití napájení 30 V ss ze stolního zdroje. Měřením bylo zjištěno, že použité regulátory jsou schopny dodat nastavený proud 770 mA, k regulaci dochází očekávaným způsobem bez výpadků a překmitů. Při použití pulzně šířkově modulovaného signálu k nastavení intenzity světla LED reaguje spínaný zdroj také bez nežádoucích efektů. Byl tedy ustanoven závěr, že při použití adekvátních výkonových součástek je možné navržené zařízení provozovat i dle zadání ze síťového napětí. Bylo také dokázáno, že celkový příkon by nepřesáhl limit 30 W.

Tato práce nabízí několik možností, kterými je možné se v budoucnu zabývat. V prvé řadě jde o ověření funkce při použití adekvátních komponent pro napájení ze

síťového napětí. I přes řadu výpočtů a dílčích experimentů, které potvrzují správnost výše popsaného návrhu, je vhodné ověřit činnost zařízení i v těchto podmínkách. Za druhé, pro správnou činnost osvětlení je žádoucí, aby došlo k umístění zdroje světla do mechanického těla, které zajistí rozptyl a směrování světla. Ať už se jedná o LED žárovku pro domácí použití, průmyslový reflektor či světla automobilu, ve všech případech hraje umístění zdroje světla do mechaniky velkou roli. I světlo z tohoto zařízení by bylo vhodné adekvátně nasměrovat a rozptýlit, aby mohlo naplno vykonávat svou funkci.

SEZNAM LITERATURY

- [1] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-730-0184-5.
- [2] Module 6: LIGHT EMITTING DIODE (LED): Lecture : LED - I. *Centre For Distance Engineering Education Programme* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: [http://www.cdeep.iitb.ac.in/nptel/Electrical%20&%20Comm%20Engg/Optical%20Communication/mod\(LED\)/slides/Sec-1/1.html](http://www.cdeep.iitb.ac.in/nptel/Electrical%20&%20Comm%20Engg/Optical%20Communication/mod(LED)/slides/Sec-1/1.html)
- [3] SCHUBERT, E. LED basics: Electrical properties. *Rensselaer Polytechnic Institute* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap04/chap04.htm>
- [4] PN-Junction Principles. *Slideshare.net* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/chinkitkit/chapter-4b>
- [5] Summary of LED characteristics. *LED Characteristics & Colours* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://www.radio-electronics.com/info/data/semicond/leds-light-emitting-diodes/characteristics.php>
- [6] A. Huttunen, T. Happonen and M. Välimäki, "Processing and reliability of bare die LED chip bonding on flexible plastic substrate," *2016 6th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC)*, Grenoble, 2016, pp. 1-5. doi: 10.1109/ESTC.2016.7764475
- [7] Lee, Tsung-Xian & Gao, Ko-Fon & Chien, Wei-Ting & Sun, Ching-Cherng. (2007). Light extraction analysis of GaN-based light-emitting diodes with surface texture and/or patterned substrate. *Optics express*. 15. 6670-6. 10.1364/OE.15.006670.
- [8] YAG:Ce phosphor-based white LED. *E. F. Schubert Light-Emitting Diodes* [online]. Cambridge University Press [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://i.stack.imgur.com/qYtFm.jpg>
- [9] LINDER, Norbert. LEDs for Solid State Lighting [online]. SEREC, 25 June 2009. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: http://www.serec.ethz.ch/eventprog/LEDs_for_Solid_State_Lighting.pdf
- [10] Color temperature. *Lightningdesignlab.com* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://www.lightingdesignlab.com/resources/articles/articles-lighting-fundamentals/color-temperature>
- [11] HABEL, Jiří, Karel DVOŘÁČEK, Vladimír DVOŘÁČEK a Petr ŽÁK. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013, 624 s. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [12] FUKSA, Antonín. Světlo a biologické hodiny. *Světlo*, č. 6, 2010. s. 56-58. ISSN 1212-0812. [vid. 2014-3-10]. Dostupné též z: <http://www.odbornecasopisy.cz/pdfclick.php?id=42567>

- [13] ŽÁK, Petr. Biodynamické systémy osvětlení. Světlo, č. 2, 2005. ISSN 1212-0812. [vid. 2017-12-13]. Dostupné též z:
http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34942
- [14] XLamp XHP70.2: Next Generation of Extreme High Power LEDs. Cree.com/led-components [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z:
<http://www.cree.com/led-components/products/xlamp-leds-arrays/xlamp-xhp70-2>
- [15] BILLINGS, Keith a Taylor MOREY. *Switchmode power supply handbook*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2011. ISBN 9780071639729.
- [16] Choosing the optimum switching frequency of your DC/DC converter. *Eetimes.com* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z:
https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1272335
- [17] HV9961: General purpose LED driver. *Microchip.com* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/HV9961>
- [18] Guide to Selecting Inductors for Switching Regulators. *PowerElectronics.com* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z:
<http://www.powerelectronics.com/content/guide-selecting-inductors-switching-regulators>
- [19] MOSFET Selection For Switching Power Supply Systems. *PowerElectronics.com* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z:
<http://www.powerelectronics.com/power-electronics-systems/mosfet-selection-switching-power-supply-systems>
- [20] Van den Bossche, Alex. (2014). Reduced Losses in PV Converters by Modulation of the DC Link Voltage. *International Journal of Energy and Power Engineering*. 3. 125. 10.11648/j.ijepe.20140303.13.
- [21] Planckian Locus. In: *Wikipedia, the free encyclopedia: Planckian locus* [online]. 2005, 2005 [cit. 2018-05-19]. Dostupné z:
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/ba/PlanckianLocus.png>
- [22] ŠTĚPÁNKOVÁ, Eva. Barva, její definice a barvové prostory. *Chempoint* [online]. Brno: VUT v Brně, Fakulta chemická, 2011 [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/barva-jeji-definice-a-barvove-prostory>
- [23] Optimizing PCB Thermal Performance for Cree ® XLamp ® LEDs: *Product design guide* [online]. 2016, 21 s. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z:
http://www.cree.com/led-components/media/documents/XLamp_PCB_Thermal.pdf
- [24] Thermal Management of Cree ® XLamp ® LEDs: *Application note* [online]. 2016, 19 s. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://www.cree.com/led-components/media/documents/XLampThermalManagement.pdf>
- [25] SinkPAD Gen II CP Copper Base 21 mm Star Board for XHP70. In: *Lck-led.com* [online]. 26. 3. 2015 [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: http://www.lck-led.com/images/SP_XHP70_6V12V.JPG

- [26] *LED Color Mixing: Basics and Background: Technical article* [online]. In: 2016, s. 23 [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: http://www.cree.com/led-components/media/documents/LED_color_mixing.pdf
- [27] The Science of Color. *ECOS Systems* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://www.ecosystem.com/the-science-of-color-en.html>
- [28] Circadian Rhythm Lighting. *USAI Lightning* [online]. 16. 3. 2015 [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://www.usailighting.com/circadian-rhythm-lighting>
- [29] The Circadian Rhythm and Color Temperature. *Sigma Luminous* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://sigmaluminous.com/the-circadian-rhythm-and-color-temperature/>
- [30] *Hvězdářská ročenka*. Praha: Hvězdárna a planetárium hlavního města Prahy, 1921. ISBN 978-80-905129-7-9. ISSN 0373-8280.
- [31] YALLOP, B. D. a C. Y. Hohenkerk. *ASTRONOMICAL INFORMATION SHEET No. 7: A note on sunrise, sunset and twilight times and on the illumination conditions during twilight*. [online]. In: Taunton, Somerset: THE UNITED KINGDOM HYDROGRAPHIC OFFICE, 1996, 6.3.1996, s. 2 [cit. 2018-05-19].
- [32] EVENSEN, Ida. *How To Simulate A Natural Daylight Environment Using Artificial Lighting A Study on the Circadian Cycle and Ways to Control it by Light* [online]. London, 2013 [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/262536062>. Thesis. University College London.

SEZNAMY SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

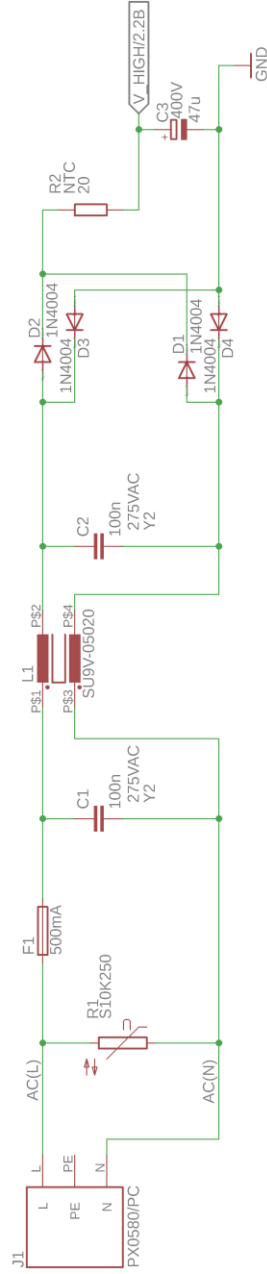
c	$[\text{m.s}^{-1}]$	rychlost světla ve vakuu
e	$[\text{C}]$	elementární náboj
EM	-	elektro-magnetismus
E	$[\text{eV}]$	energie zakázaného pásu
Φ	$[\text{lm}]$	světelný tok
h	$[\text{eV.s}]$	Planckova konstanta
λ	$[\text{nm}]$	vlnová délka záření
LED	-	luminiscenční dioda
MOSFET	-	polem řízený tranzistor
NTC	-	termistor se záporným teplotním koeficientem
PWM	-	pulzně šířková modulace
R_a	$[-]$	index podání barev
R_{DSon}	$[\Omega]$	odpor kanálu tranzistoru při sepnutém stavu
T_c	$[\text{K}]$	teplota chromatičnosti záření

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 - Elektrická schémata.....	2
Příloha 2 – Soupiska součástek hlavní desky.....	8
Příloha 3 – soupiska součástek desky LED.....	9
Příloha 4 – výrobní data hlavní DPS.....	10
Příloha 5 – Výrobní data LED DPS	12
Příloha 6 – Zdrojový kód pro mikrokontrolér	13

Příloha 1 - Elektrická schémata

VSTUPNÍ FILTR A USMĚŘŇOVAČ



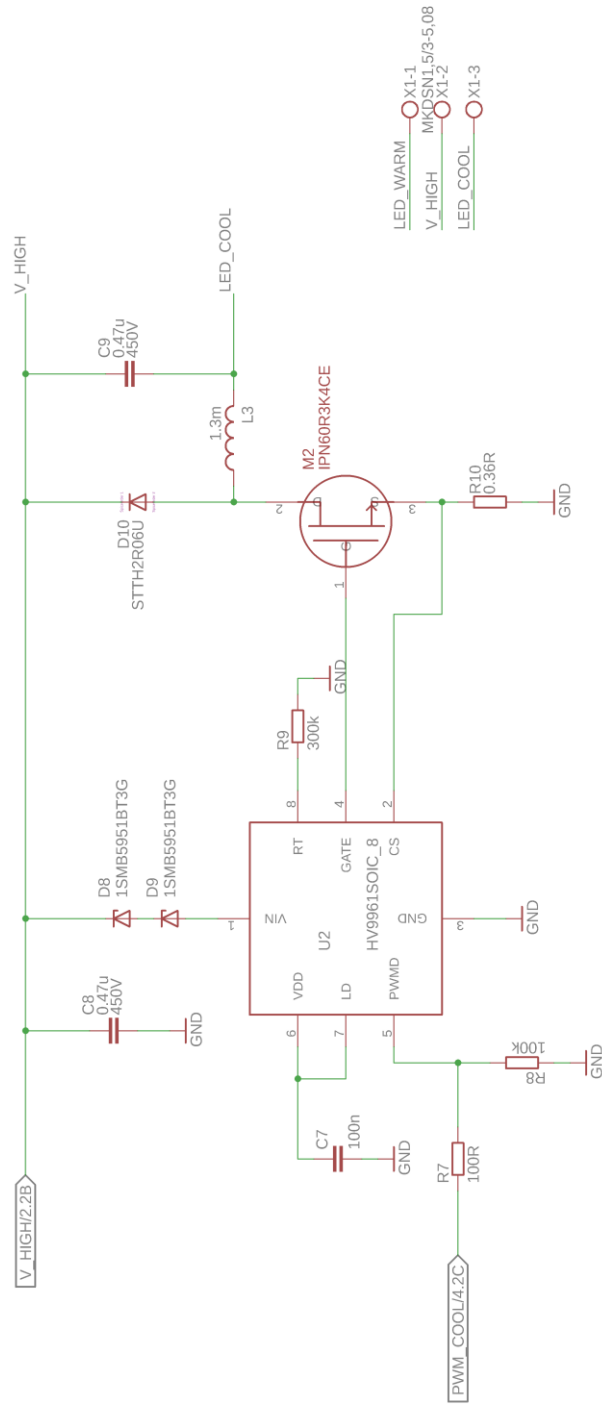
DP Moravek (hlavni)	
20.05.2018 11:43	
Sheet: 1/4	6

OBVOD TEPLÉ SLOŽKY SVĚTLA

The diagram illustrates the internal circuit of a warm light module. It features a V_HIGH input terminal connected to a 0.47uF capacitor (C5) and a 15SMB5951BT3G diode (D5). The output of D5 is connected to a 15SMB5951BT3G diode (D6), which is then connected to a 300k resistor (R5). The other end of R5 is connected to the GATE pin of the HV9961SOIC_8 IC (U1). The VDD pin of U1 is connected to a 100nF capacitor (C4) and a 100R resistor (R3). The LD pin of U1 is connected to a 100k resistor (R4). The PWM pin of U1 is connected to a 0.36 resistor (R6). The GND pin of U1 is connected to GND. The MOSFET (M1, IPN60R3K4CE) has its gate connected to the GATE pin of U1, its drain connected to the LED_WARM output, and its source connected to GND. A 1.3mH inductor (L2) is connected between the LED_WARM output and a 0.47uF capacitor (C6), which is then connected to GND. A STTH2R06U diode (D7) is connected between the LED_WARM output and GND.

DP Moravek (hlavni)
20.05.2018 11:43
Sheet: 2/4

OBVOD STUDENÉ SLOŽKY SVĚTLA



DP Moravek (hlavni)

20.05.2018 11:43

Sheet: 3/4

6

5

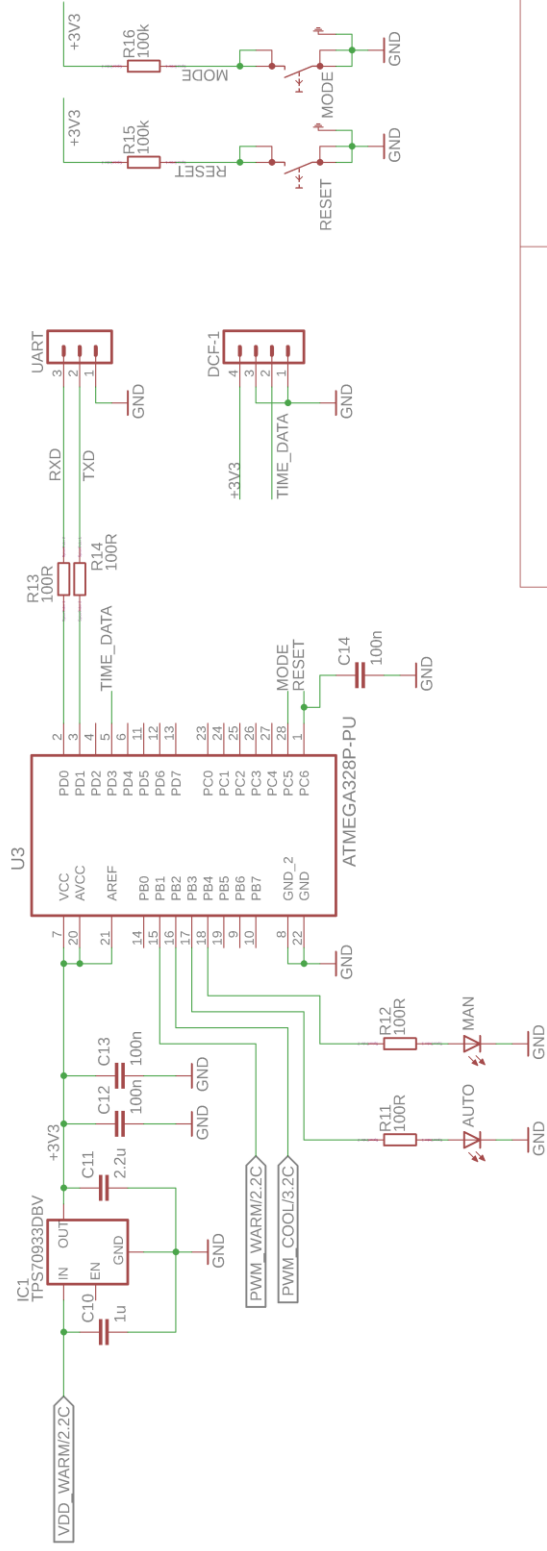
4

3

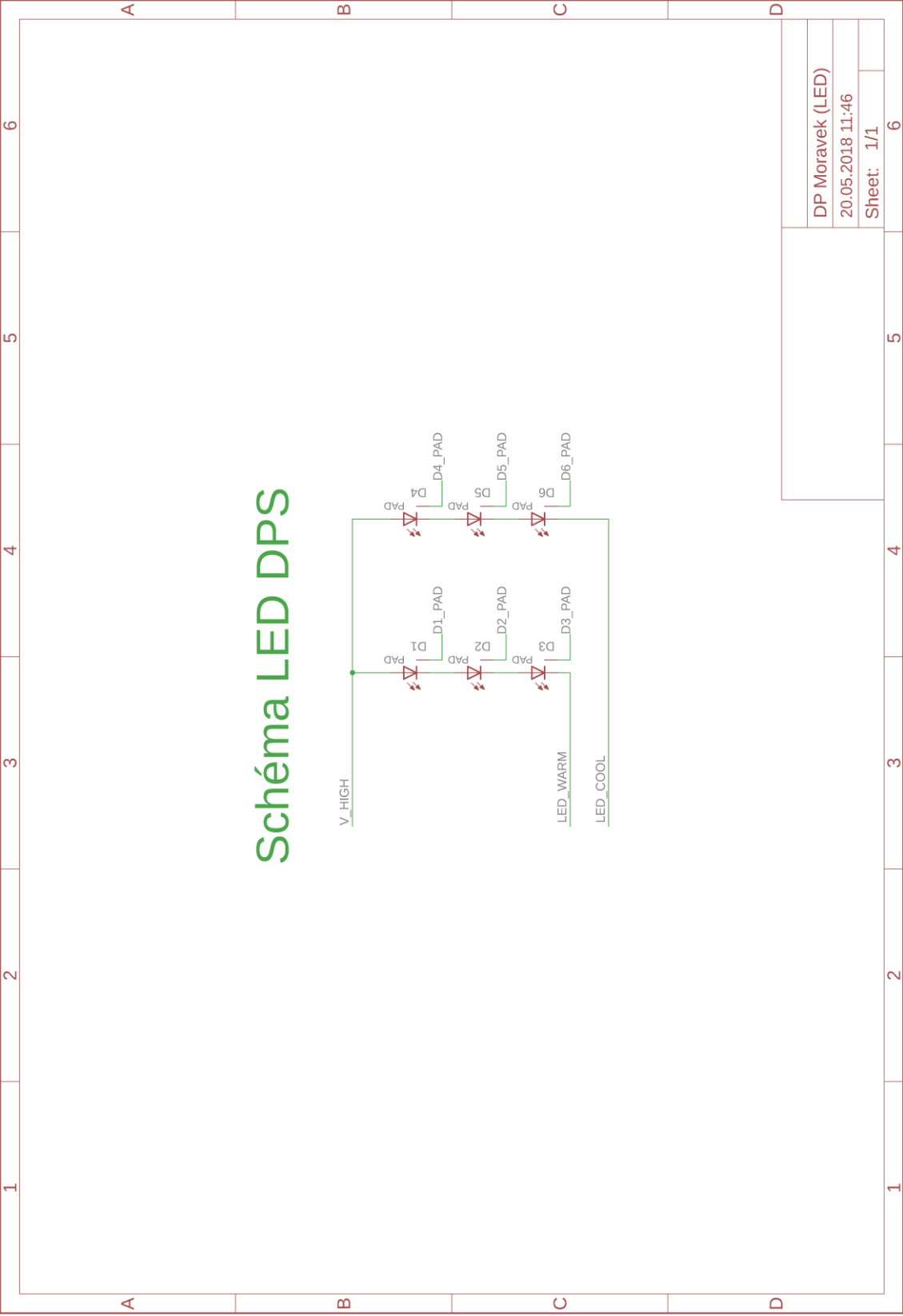
2

1

OBVOD ŘÍDÍCÍ LOGIKY



DP Moravek (hlavni)
20.05.2018 11:43
Sheet: 4/4



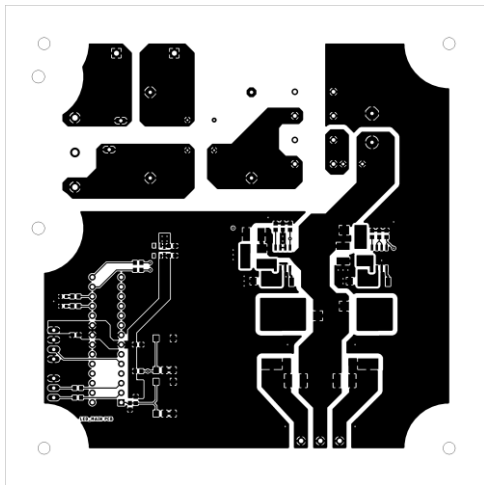
Příloha 2 – Soupiska součástek hlavní desky

Součástky	Počet	Hodnota	Napětí	Pouzdro	Popis
C1, C2	2	100n	275VAC	C22.5B10	Kondenzátor
C10	1	1u		0603	Kondenzátor
C11	1	2.2u		0603	Kondenzátor
C3	1	47u	400V	E7,5-16	Kondenzátor, elektrolytický
C4, C7, C12, C13, C14	5	100n		0603	Kondenzátor
C5, C6, C8, C9	4	0.47u	450V	1812	Kondenzátor
D1, D2, D3, D4	4	1N4004		DO41-10	Dioda, usměrňovací
D5, D6, D8, D9	4	1SMB5951BT3G		DO214AA	Dioda, Zenerova, 120 V, 3 W
D7, D10	2	STTH2R06U		DIODE_SMB	Schottky Diode
F1	1	500mA		FUSE HOLDER_5 X20MM	Pojistka
IC1	1	TPS70933DBV		SOT23-5	3.3V Regulátor
J1	1	PX0580/PC		PX0580/PC	IEC konektor
J2	1			MA03-1	PIN HEADER, Uart
J3	1			MA04-1	PIN HEADER, DCF-1
L1	1	SU9V-05020		SU9V	Common mode choke
L2, L3	2	1.3m		12x12mm	Tlumivka
LD1, LD2	2			SML0603	LED
M1, M2	2	IPN60R3K4CE		SOT223	N-Type MOS Field Effect Transistor (MOSFET)
R1	1	S10K250		S10K250	Varistor
R10	1	0.36R		1206	Rezistor
R11, R12, R13, R14	4	100R		0603	Rezistor
R15, R16	2	100k		0603	Rezistor
R2	1	20		0207/5V	Rezistor, NTC
R3, R7	2	100R		0603	Rezistor
R4, R8	2	100k		0603	Rezistor
R5, R9	2	300k		0603	Rezistor
R6	1	0.36		1206	Rezistor
S1, S2	2	SKHMPSE010		SKHMPXE010	6.2 X 6.5mm TACT Switch (SMD)
U1, U2	2	HV9961SOIC_8		SOIC8	LED Driver
U3	1	ATMEGA328P- PU		PDIP-28	8-bit Microcontroller with In-System Programmable Flash
X1	1	MKDSN1,5/3- 5,08		MKDSN1,5/3- 5,08	Terminál, šroubovací, 5.08mm, 3 pozice

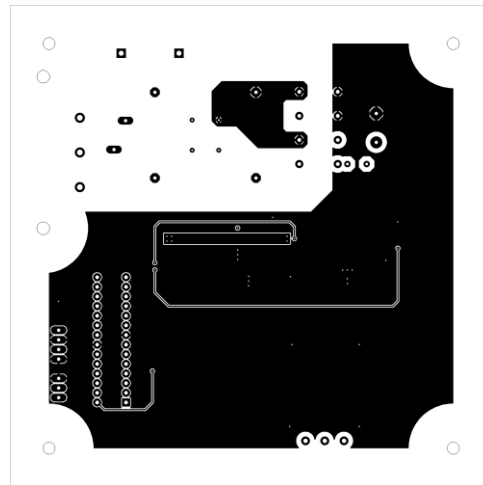
Příloha 3 – soupiska součástek desky LED

Součástky	Počet	Hodnota	Pouzdro	Popis
D1, D2, D3	3	XHP70B-00-0000-0D0HM430G	XPH70.2	LED, Bílá, 3000 K
D4, D5, D6	3	XHP70B-00-0000-0D0BN40E2	XPH70.2	LED, Bílá, 5700 K

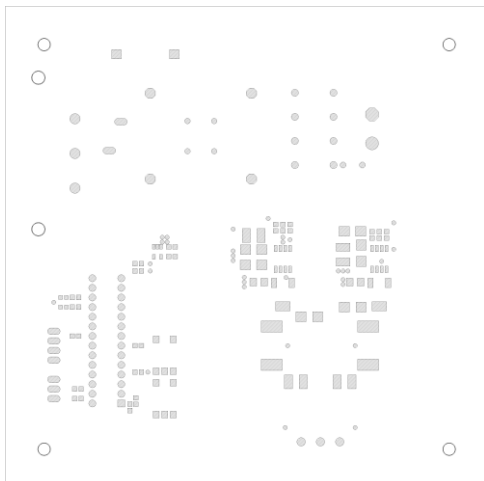
Příloha 4 – výrobní data hlavní DPS



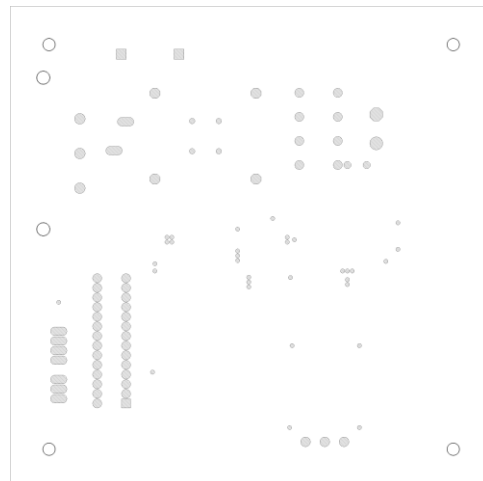
1 - Měděná vrstva, strana spojů, 1:2



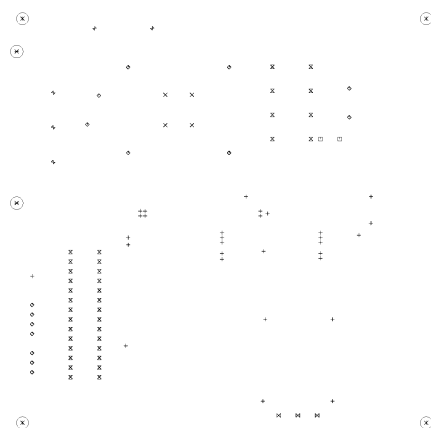
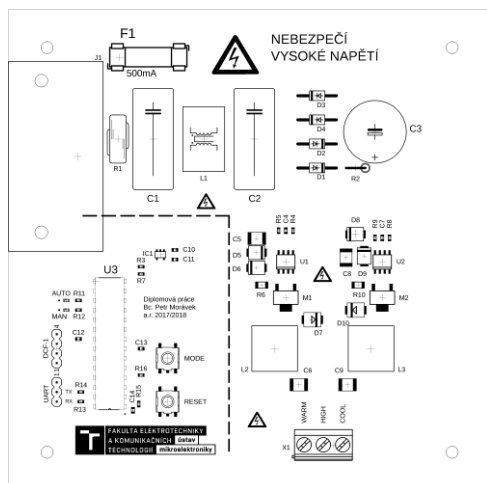
2 - Měděná vrstva, strana součástek, 1:2



3 - Nepájivá maska, strana spojů, 1:2

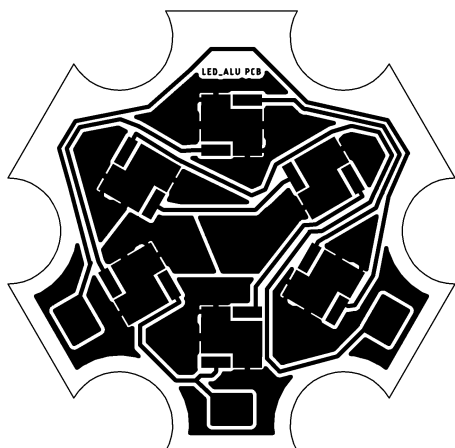


4 - Nepájivá maska, strana součástek, 1:2

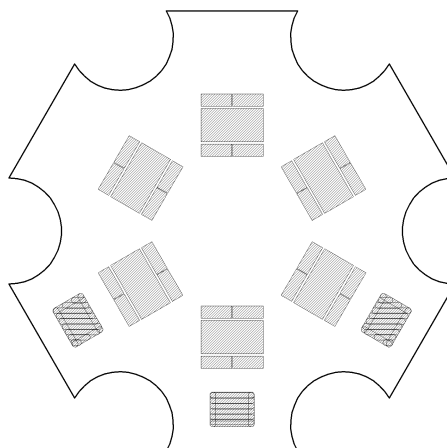


LAYER-STACK	Sym	N°	Mils	MM	Qty	Plated
01-16	+	1	20	0.50	30	YES
01-20	x	2	24	0.60	4	YES
	□	3	32	0.81	2	YES
	◇	4	40	1.02	15	YES
	z	5	44	1.12	36	YES
	△	6	51	1.30	3	YES
	+	7	56	1.42	2	YES
	+	8	63	1.60	3	YES
	x	9	126	3.20	4	NOT
	x	10	134	3.40	2	NOT

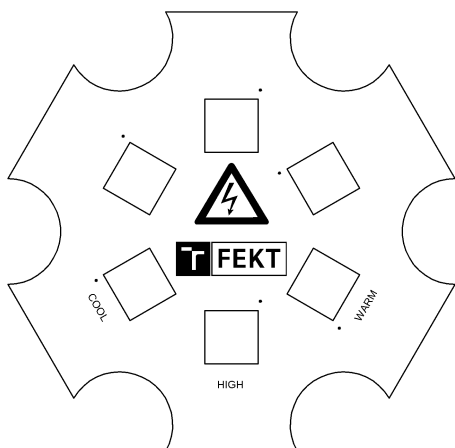
Příloha 5 – Výrobní data LED DPS



7 - Nepájivá maska, strana součástek, 1:1



8 - Měděná vrstva, strana součástek, 1:1



9 - Servisní potisk, strana součástek, 1:1

Příloha 6 – Zdrojový kód pro mikrokontrolér

```
//Zdrojovy kod pro ATmega328
//Diplomova prace bc. Petr Morávek
//a.r. 2017/2018
/*
_____/
*/
//pripojeni knihovny pro zachazeni s
modulem DFC-1
#include <dcf77.h>
//pojmenovani vstupnich a vystupnich pinu
const int ModeButton = A5;
const int WarmPWM = 9;
const int CoolPWM = 10;
const int AutoLED = 11;
const int ManLED = 12;
const int dcf1VstupPin = 3;
/*
_____/
*/
//deklarace hranic casovych intervalu pro
automaticky rezim
const int8_t CasovaZona = 0;

const int minuty[37][8] = {
  { 0, 0, 20, 41, 3, 25, 47, 8},
  { 0, 58, 18, 43, 8, 33, 58, 18},
  { 0, 53, 11, 41, 11, 41, 12, 30},
  { 0, 43, 0, 36, 13, 50, 27, 44},
  { 0, 30, 46, 30, 14, 58, 43, 59},
  { 0, 14, 29, 21, 14, 7, 0, 15},
  { 0, 54, 9, 10, 12, 14, 16, 31},
  { 0, 33, 48, 59, 10, 21, 32, 48},
  { 0, 9, 27, 47, 7, 27, 48, 6},
  { 0, 43, 4, 34, 4, 34, 4, 26},
  { 0, 16, 42, 21, 1, 41, 21, 48},
  { 0, 48, 21, 10, 59, 48, 38, 12},
  { 0, 18, 0, 58, 57, 56, 55, 39},
  { 0, 46, 42, 49, 57, 4, 12, 10},
  { 0, 10, 26, 41, 57, 12, 28, 47},
  { 0, 17, 14, 36, 58, 20, 42, 59},
  { 0, 0, 7, 33, 59, 25, 52, 59},
  { 0, 0, 6, 33, 1, 29, 57, 59},
  { 0, 0, 10, 36, 3, 30, 57, 59},
  { 0, 0, 19, 42, 5, 28, 51, 59},
  { 0, 8, 32, 49, 6, 23, 40, 1},
  { 0, 46, 47, 56, 6, 15, 25, 24},
  { 0, 17, 3, 3, 4, 5, 6, 51},
  { 0, 44, 20, 11, 3, 54, 46, 21},
  { 0, 8, 36, 18, 0, 42, 25, 52},
  { 0, 29, 52, 24, 57, 29, 2, 24},
  { 0, 49, 8, 31, 54, 17, 40, 58},
  { 0, 6, 23, 36, 50, 3, 17, 34},
  { 0, 23, 38, 42, 47, 51, 56, 11},
  { 0, 39, 54, 49, 45, 40, 36, 51},
  { 0, 54, 9, 56, 43, 30, 18, 33},
  { 0, 8, 25, 4, 43, 22, 2, 18},
  { 0, 22, 40, 12, 44, 16, 49, 7},
  { 0, 35, 54, 20, 47, 14, 41, 0},
  { 0, 46, 6, 28, 51, 14, 37, 57},
  { 0, 54, 15, 35, 56, 16, 37, 58},
  { 0, 59, 20, 40, 1, 21, 42, 3},
};

const int hodiny[37][8] = {
  { 0, 6, 7, 9, 12, 14, 16, 18},
  { 0, 5, 7, 9, 12, 14, 16, 18},
  { 0, 5, 7, 9, 12, 14, 17, 18},
  { 0, 5, 7, 9, 12, 14, 17, 18},
  { 0, 5, 6, 9, 12, 14, 17, 18},
  { 0, 5, 6, 9, 12, 15, 18, 19},
  { 0, 4, 6, 9, 12, 15, 18, 19},
  { 0, 4, 5, 8, 12, 15, 18, 19},
  { 0, 4, 5, 8, 12, 15, 18, 20},
  { 0, 3, 5, 8, 12, 15, 19, 20},
  { 0, 3, 4, 8, 12, 15, 19, 20},
  { 0, 2, 4, 8, 11, 15, 19, 21},
  { 0, 2, 4, 7, 11, 15, 19, 21},
  { 0, 1, 3, 7, 11, 16, 20, 22},
  { 0, 1, 3, 7, 11, 16, 20, 22},
  { 0, 0, 3, 7, 11, 16, 20, 23},
  { 0, 0, 3, 7, 11, 16, 20, 23},
  { 0, 0, 3, 7, 12, 16, 20, 23},
  { 0, 0, 3, 7, 12, 16, 20, 23},
  { 0, 0, 3, 7, 12, 16, 20, 23},
  { 0, 1, 3, 7, 12, 16, 20, 23},
  { 0, 1, 3, 7, 12, 16, 20, 22},
  { 0, 2, 4, 8, 12, 16, 20, 21},
  { 0, 2, 4, 8, 12, 15, 19, 21},
  { 0, 3, 4, 8, 12, 15, 19, 20},
  { 0, 3, 4, 8, 11, 15, 19, 20},
  { 0, 3, 5, 8, 11, 15, 18, 19},
  { 0, 4, 5, 8, 11, 15, 18, 19},
  { 0, 4, 5, 8, 11, 14, 17, 19},
  { 0, 4, 5, 8, 11, 14, 17, 18},
  { 0, 4, 6, 8, 11, 14, 17, 18},
  { 0, 5, 6, 9, 11, 14, 17, 18},
  { 0, 5, 6, 9, 11, 14, 16, 18},
  { 0, 5, 6, 9, 11, 14, 16, 18},
  { 0, 5, 7, 9, 11, 14, 16, 17},
  { 0, 5, 7, 9, 11, 14, 16, 17},
  { 0, 5, 7, 9, 12, 14, 16, 18},
};

int datum [37][2] = {
  { 1, 1},
  {11, 1},
  {21, 1},
  {31, 1},
  {10, 2},
  {20, 2},
  { 2, 3},
  {12, 3},
  {22, 3},
  { 1, 4},
  {11, 4},
  {21, 4},
  { 1, 5},
  {11, 5},
  {21, 5},
  {31, 5},
  {10, 6},
  {20, 6},
  {30, 6},
  {10, 7},
  { 9, 8},
  {19, 8},
  {29, 8},
  { 8, 9},
  {18, 9},
  {28, 9},
  { 8, 10},
  {18, 10},
  {28, 10},
  { 7, 11},
  {17, 11},
  {27, 11},
  { 7, 12},
  {17, 12},
  {27, 12},
};

//deklarace promenne definujici stridu v
jednotlivych modech
int dutyData[8] = {84, 44, 0, 11, 27, 63,
```

```

84, 100});
//promenne pro nastaveni modu
int mode = 0;
int duty = 50;
//promenne pro osetreni zakmitu
int ButtonState;
int LastButtonState = HIGH;
unsigned long LastDebounceTime = 0;
unsigned long DebounceDelay = 20;

void setup() {
    //nastaveni vstupu a vystupu
    pinMode(ModeButton, INPUT_PULLUP);
    pinMode(WarmPWM, OUTPUT);
    pinMode(CoolPWM, OUTPUT);
    pinMode(AutoLED, OUTPUT);
    pinMode(ManLED, OUTPUT);
    pinMode(dcf1VstupPin, INPUT_PULLUP);
    //smycka blikani LED po zapnuti,
    //zpusobi zpozdeni nabehu mikrokontroleru
    //aby zbytek zarizeni dosahl ustaleneho
    //stavu
    boot();
    //nastaveni Timer1
    //phase+frequency correct PWM
    //kanal A normalni, kanal B invertovany
    //500 Hz kmitocet
    //interrupt na pretečení
    TCCR1A = 0;
    TCCR1B = 0;
    ICR1 = 127;
    OCR1A = 0;
    OCR1B = ICR1;
    TCCR1A = _BV(COM1A1) | _BV(COM1B1) |
    _BV(COM1B0) | _BV(WGM11);
    TCCR1B = _BV(CS10) | _BV(CS11) |
    _BV(WGM13);
    TIMSK1 = _BV(TOV1);
}

void loop() {
    nastavení módu, viz. tabulka 5
    switch (mode) {
        case 0: { //mod "vypnuto"
            OCR1A = 0;
            OCR1B = ICR1;
        } break;
        case 1: { //mod "automat"
            digitalWrite(ManLED, LOW);
            digitalWrite(AutoLED, HIGH);
            automaticMode();
        } break;
        case 2:
        case 3:
        case 4:
        case 5:
        case 6:
        case 7:
        case 8:
        case 9: { //mod "manual"
            digitalWrite(AutoLED, LOW);
            digitalWrite(ManLED, HIGH);
            duty = dutyData[mode - 2];
            OCR1A = ICR1 * duty / 100;
            OCR1B = ICR1 * duty / 100;
        } break;
        default:
            mode = 0;
            break;
    }
}

void automaticMode() { //funkce
    automatickeho modu

    DCF77_Clock::setup(); //nastaveni
    komunikacniho kanalu s prijimacem

    DCF77_Clock::set_input_provider(nacteniV
    stupDat);

    int toggle = 0;
    //smycka pro synchronizaci prijimace s
    vysilacem
    for (uint8_t state = Clock::useless;
        state == Clock::useless || state
        == Clock::dirty;
        state =
        DCF77_Clock::get_clock_state()) {
        digitalWrite(AutoLED, (toggle) ? HIGH
        : LOW);
        toggle = !toggle;
        Clock::time_t aktualniCas;

    DCF77_Clock::get_current_time(aktualniCa
    s);
    }
    digitalWrite(AutoLED, HIGH);
    //vycteni casu do promenne, po peti
    neuspesnych pokusech se prerusi
    Clock::time_t aktualniCas;
    toggle = 0;
    do {

    DCF77_Clock::get_current_time(aktualniCa
    s);
        upravaDat(aktualniCas, CasovaZona);
        ++toggle;
        if (toggle > 5) {
            break;
        }
    } while (Clock::useless || Clock::dirty
    || Clock::locked);
    int radek = 0;
    int sloupec = 0;
    //hledani spravne stridy pro LED driver
    v datech vyse
    for (int l = 0; l < 38; l++) {
        if (aktualniCas.month < datum[l][1]
        && aktualniCas.day < datum[l][0]) {
            if (l == 0)
                radek = l;
            else
                radek = l - 1;
        }
    }
    for (int k = 0; k < 9; k++) {
        if (aktualniCas.hour < hodiny
        [radek][k] && aktualniCas.minute <
        minuty[radek][k]) {
            if (k == 0)
                sloupec = k;
            else
                sloupec = k - 1;
        }
    }
    //nastaveni spravne stridy
    duty = dutyData[sloupec];
    OCR1A = ICR1 * duty / 100;
    OCR1B = ICR1 * duty / 100;
    }
    //kod preruseni Timer1
    //obsahuje osetreni zakmitu tlacitka pro
    nastaveni modu
    //a zmenu modu, pokud dojde k jeho
    skutecnemu stisknuti
    ISR(TIMER1_OVF_vect) {
        int reading = digitalRead(ModeButton);

```

```

    if (reading != LastButtonState) {
        LastDebounceTime = millis();
    }
    if ((millis() - LastDebounceTime) >
DebounceDelay) {
        if (reading != ButtonState) {
            ButtonState = reading;
            if (ButtonState == LOW) {
                if (mode >= 9) {
                    mode = 0;
                }
                else {
                    mode++;
                }
            }
        }
        LastButtonState = reading;
    }
    //funkce pro upravu ziskanych hodnot do
citelneho stavu
void upravaDat(Clock::time_t &time, const
int8_t offset) {
    int8_t          hour          =
BCD::bcd_to_int(time.hour) + offset;
    if (hour > 23) {
        hour -= 24;
    }
    uint8_t          day          =
BCD::bcd_to_int(time.day) + 1;
    if (day > pocetDnuMesic(time)) {
        day = 1;
    }
    uint8_t          month        =
BCD::bcd_to_int(time.month);
    ++month;
    if (month > 12) {
        month = 1;
    }
    uint8_t          year         =
BCD::bcd_to_int(time.year);
    ++year;
    if (year > 99) {
        year = 0;
    }
    time.year
BCD::int_to_bcd(year);
    time.month
BCD::int_to_bcd(month);
    time.day = BCD::int_to_bcd(day);
}
    if (hour < 0) {
        hour += 24;
    }
    uint8_t          day          =
BCD::bcd_to_int(time.day) - 1;
    if (day < 1) {
        uint8_t          month        =
BCD::bcd_to_int(time.month);
        --month;
        if (month < 1) {
            month = 12;
        }
        int8_t          year         =
BCD::bcd_to_int(time.year);
        --year;
        if (year < 0) {
            year = 99;
        }
        time.year
BCD::int_to_bcd(year);
    }
    time.month
BCD::int_to_bcd(month);
    day = pocetDnuMesic(time);
    time.day = BCD::int_to_bcd(day);
}

    }
    time.hour = BCD::int_to_bcd(hour);
}

//funkce nacitajici vstupni data
uint8_t nacteniVstupDat() {
    const uint8_t nactenaData =
digitalRead(dcf1VstupPin);
    digitalWrite(AutoLED, nactenaData);
    return nactenaData;
}

//pomocna funkce pro urceni delky mesice
uint8_t pocetDnuMesic(const Clock::time_t
&aktualniCas) {
    switch (aktualniCas.month.val) {
        case 0x02:
            return 28 + ((aktualniCas.year.val
!= 0) && ((bcd_to_int(aktualniCas.year) &
0x03) == 0) ? 1 : 0);
        case 0x01: case 0x03: case 0x05: case
0x07: case 0x08: case 0x10: case 0x12:
            return 31;
        case 0x04: case 0x06: case 0x09: case
0x11: return 30;
        default: return 0;
    }
}

//funkce zpozdujici spusteni zarizeni
void boot() {
    for (int i = 0; i < 3; ++i) {
        for (int j = 0; j < 2; ++j) {
            if (i == 2) {
                digitalWrite(11, HIGH);
                digitalWrite(12, HIGH);
                delay(50);
                digitalWrite(11, LOW);
                digitalWrite(12, LOW);
                delay(200);
            }
            else {
                digitalWrite(11 + i, HIGH);
                delay(50);
                digitalWrite(11 + i, LOW);
                delay(200);
            }
        }
    }
}

```